

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-6>

УДК 519.71, 629.051, 621.398

ГУРИНЕНКО Станіслав

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

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

e-mail: stas_gurynenko@ukr.net

БУРАУ Надія

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

<https://orcid.org/0000-0001-6848-816X>

e-mail: nbureau@ukr.net

ОГЛЯД МАТЕМАТИЧНИХ ТА АЛГОРИТМІЧНИХ МЕТОДІВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ БАГАТОЦІЛЬОВОГО АВТОНОМНОГО БЕЗПЛОТНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА ІЗ СКЛАДНОЮ ДИНАМІКОЮ РУХУ

У роботі розглянуті джерела, праці та дослідження математичних та алгоритмічних методів і підходів до розробки систем керування багатоцільовими автономними безпілотними підводними апаратами. Показано, як реалізується та впроваджується забезпечення автоматичного керування в умовах складної динаміки руху апарата, за допомоги різних підходів, алгоритмів та методів керування.

Представлено та наведено опис робіт та праць за останні 10-15 років в області математичного та алгоритмічного методів автоматичного керування рухомими об'єктами, що працюють та діють у водному та підводному середовищах. Розглянуто досвід вирішення питань автоматичного керування, як теоретичного так і практичного аспектів. Досвід останніх десятиліть показав різноманітні підходи та методи, проте дослідження систем керування відбувається на основі базових знань про об'єкт, а також, у більшості випадків, при проведенні досліджень систем керування не розглядається конструктивні особливості апарата, характер руху апарата та завдання, які ставляться перед апаратом. Враховуючи попередній досвід та проведені дослідження у даній тематиці пропонується підхід інтегрованого та комплексного дослідження системи автоматичного керування, яка видає сигнали керування враховуючи не тільки динаміку руху апарата, а і конструкційні особливості апарата, гідродинамічні параметри, які залежать від конструкції апарата, просторове положення апарата, яке уточнюється системою орієнтації та навігації, застосування вихідної інформації системи орієнтації та навігації, як інформації зворотного зв'язку для уточнення коефіцієнтів керування та покращення точності та якості керування.

Проаналізовано актуальні роботи в області автоматичного керування багатоцільовими маневровими автономними безпілотними підводними апаратами зі складною динамікою. Проведено критичний аналіз проблематики керування багатоцільовими автономними безпілотними підводними апаратами зі складною динамікою та представлено спосіб покращення існуючих методів керування багатоцільовими підводними апаратами зі складною динамікою.

Ключові слова: Автономний безпілотний підводний апарат (АБПА), система автоматичного керування (САК), система керування.

GURYNENKO Stanislav, BOURAOU Nadiia

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

A REVIEW OF MATHEMATICAL AND ALGORITHMIC METHODS OF CONTROL SYSTEMS A MULTI-PURPOSE AUTONOMOUS UNMANNED UNDERWATER VEHICLE WITH COMPLEX MOTION DYNAMIC

This article presents sources, researches and investigations of mathematical and algorithmic methods and approaches of control systems of multipurpose autonomous unmanned underwater vehicles. The research describe, how automation control with help of different methods, approaches and algorithms is instrumented and implemented in conditions of complex dynamic of autonomous unmanned underwater apparatus.

A description of works and works over the past 10-15 years in the field of mathematical and algorithmic methods of automatic control of moving objects operating and operating in water and underwater environments is presented and given. The issues and experience of theoretical and practical automatic control are considered. Last decade experience provide us with different approaches and methods, however control system researches based on preliminary knowledge about apparatus, moreover, in the most cases, during the research of the control systems the apparatus design features, the apparatus movement nature and missions and tasks which set under apparatus. Take into account the previous experience and conducted researches in this topic, an approach of integrated and comprehensive research of the automatic control system is proposed, which issues control signals taking into account not only the dynamics of the apparatus movement, but also the design features of the apparatus, hydrodynamic parameters that depend on the design of the apparatus, the apparatus spatial position, which refined by the orientation and navigation system, the application of the initial information of the orientation and navigation system as feedback information to refine the control coefficients and improve the accuracy and quality of control.

Current works in the field of automatic control of multi-purpose autonomous unmanned underwater vehicles with complex dynamics are analysed. A critical analysis of the problems of control multi-purpose autonomous unmanned underwater vehicles with complex dynamics is carried out, and a way to improve existing methods of controlling multi-purpose underwater vehicles with complex dynamics is presented.

Key words: Autonomous unmanned underwater vehicle (AUUV), automatic control system (ACS), control system.

**Постановка проблеми у загальному вигляді
та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Розвиток безпілотної підводної робототехніки ставить перед розробниками та дослідниками завдання пошуку нових методів керування та забезпечення тривалої автономної роботи безпілотної підводного апарата, особливо для апаратів багатоцільового призначення. Успішне розв'язання задач керування рухомими підводними об'єктами в багатьох випадках визначається рівнем розуміння того, як буде рухатися об'єкт та які завдання ставитимуться перед об'єктом. Проблема побудови систем автоматичного керування для багатоцільових АБПА полягає як у виборі методу реалізації керування так і у виборі датчиків первинної інформації. Розвиток сучасних систем керування рухом у просторі відбувається в умовах підвищення вимог до ефективності виконання об'єктом основних цільових задач – забезпечення бажаної точності характеристик керування рухомих об'єктів. Водночас, підвищуються вимоги до рівня надійності та терміну функціонування, при жорстких обмеженнях характеристик енергоефективності.

Сучасні розробки систем керування багатоцільовими АНПА, особливо із складною динамікою руху вимагають вивчення нових підходів до їх проектування, створення нової елементної бази, використання нових інформаційних технологій, які дозволяють проводити дослідження систем та імітувати динаміку руху об'єкта. Незважаючи на суттєві досягнення в області проектування та розробки систем керування, забезпечення виконання часто виникаючих суперечливих вимог залишається складною задачею наукових і технічних досліджень. Тому якісне розв'язання задач проектування систем керування вимагає вивчення та впровадження нових підходів у розробці та проектуванні, створення спеціального інформаційно-програмного забезпечення, на основі математичних моделей, імітаційного моделювання та чисельного дослідження, що забезпечить адаптивне керування відповідно до змінних внутрішніх і зовнішніх умов використання, діагностику, аналіз і синтез окремих складових системи та ефективне об'єднання аналітичної та інформаційної систем в єдину систему керування.

Робота [1] аналіз існуючих підводних апаратів та показує актуальність та перспективи використання та розробки сучасних АБПА. Розглядаються апарати торпедоподібної форми та підводні глайдери [1, 2], а також наводяться результати які показують необхідність не тільки розробки та дослідження самих апаратів, так і необхідність у розробці та дослідженні комплексів та систем, які могли б забезпечити стійке керування, визначення місцеположення об'єкта, а також відслідковування траєкторії руху апарата та формування сигналів керування для забезпечення відповідної динаміки руху апарата у відповідності до поставлених задач.

Мета роботи – огляд і виявлення сучасних методів і перспективних рішень у проектуванні систем керування нового покоління та пропонування нового підходу, включаючи методи, пов'язані з використанням додаткової вимірювальної інформації, на основі раніше проведених досліджень. Таке дослідження дозволить пришвидшити пошук раціональних конструктивних рішень, а також виявити прогалини, які не були враховані для розширення інструментальних та програмних засобів проектування для створення або вдосконалення підходів розробки сучасних систем керування багатоцільових АБПА із складною динамікою руху.

Огляд стану проблеми та постановка задачі та їх зв'язок із науковими і практичними завданнями

У роботі [3] наведено та запропоновано реалізацію стійкої адаптивної само-організаційної схеми нейрон-нечіткого контролю (robust adaptive self-organizing neuro-fuzzy control – RASNFC) для відстежування безпілотної підводного апарата з невизначеностями та нелінійними мертвими зонами. Запропонована схема RASNFC містить в собі використання оцінювально-обчислювального адаптивного контролера (estimation-based adaptive controller – EBAC), який використовує само організаційну нейрон-нечітку мережу (self-organizing neuro-fuzzy network – SNFN) і стійкого до зовнішніх впливів контролера. EBAC сконструйовано з новітнім ковзним режимом для забезпечення необхідного закону керування основи, також забезпечується ідентифікування невідомої динамічної функції за допомогою апроксиматора SNFN, здатного самостійно побудувати нейро-нечітку мережу з динамічною структурою шляхом генерування та обрізання нечіткого правила. Стійкий до зовнішніх впливів контролер використовується, щоб забезпечити властивість кінцевого коефіцієнта посилення L2, щоб впоратися з помилками відновлення інформації, завдяки чому підвищується стійкість всієї системи керування із замкненим циклом. Теоретичний аналіз та результати роботи свідчать про те, що відстежування похибок є асимптотично стабільними, а всі сигнали у системі замкнутого циклу – обмежені.

У статті [4] представлено моделювання та керування безпілотним транспортним засобом із середнім ступенем здатності виконувати безперебійну роботу в повітрі та/або під водою. Система керування об'єктом розглядається, як гібридна мульти-середня система із постійною динамікою. Неперервна динаміка об'єкта моделюється формалізмом Ньютона-Ейлера із урахуванням ефектів плавучості та ефектів опору, які зазвичай нехтуються у дослідженнях як повітряних так і підводних об'єктів. Система керування базується, яка розглядається та моделюється у роботі [4], на використанні гібридного контролера, призначення якого є відслідковування траєкторії руху об'єкта із урахуванням сигналів повної системи, яка представляє собою

гібридну систему замкненого циклу, а також стратегію забезпечення перемикання між повітряним та водним середовищами. Ефективність такої системи у роботі [4] перевіряється моделюванням. Також була розроблена та наведена експериментальна платформа, яка відпрацьовувала роботу системи керування у повітрі, під водою та під час переходу від одного середовища до іншого.

Робота [5] описує порівняння інтегрованих методик наведення, навігації та керування автономними підводними апаратами військового призначення завданням яких є пошук підводних мін та їх розмінування. Автори проводять дослідження та моделювання цих методик, задаючи відомі та невідомі збурення, які можуть містити гармонічні складові та оцінюють вихідні величини та як кожна методика визначає необхідні величини у випадку наявності підводних перешкод, у даній статті у якості перешкод виступають підводні міни.

Дослідження [6] розглядає проблематику керування зануренням (зміни глибини) безпілотного підводного апарата, який зазнає впливу зовнішнього середовища. Автори розглядають поєднання традиційного зворотньокрокового методу та ковзним режимом керування. Керування зміною глибини розглядається, як зворотньокроковий метод із ковзною верхньою границею. Автори роботи [6] беруть за основу рівняння руху апарата у вертикальній площині (тобто зміну висоти), як початковий закон керування. Застосування функції Ляпунова використовується для реалізації зворотньокрокового методу. Аналіз стійкості та стабільності системи виконується на основі теорії стійкості за Ляпуновим. Результати моделювання показали, що наявність зовнішніх збурень не впливає на досягнення апаратом необхідної глибини, а запропонований метод дозволяє відслідковувати траєкторію зміни глибини.

Робота [7] є попередньою до роботи [6] із тією відмінністю, що у роботі [7] досліджувалося підвищення точності керування підводним апаратом у горизонтальній площині. Тобто автори у роботі [7] досліджували метод адаптивного керування у ковзному режимі із застосуванням граничних шарів для відслідковування траєкторного положення апарата за курсом. У відповідності до запропонованого методу автори [7] розробили адаптивні закони підбору коефіцієнтів керування (підсилювачів) та адаптивний вибір граничних шарів, які базувалися на вхідних та вихідних даних, що дозволило уникнути невизначеностей. Також, для вертикального стерня розглядалася стратегія компенсації насичення, що дозволило зробити поведінку руля напрямку більш реалістичною. Отримані результати були проілюстровані чисельним моделюванням.

У статті [8] розглянуто структуру та стратегії побудови систем керування та інерційних навігаційних систем. Наведено методи оцінювання параметрів автономного безпілотного підводного апарата. Автори даного дослідження більше зосередилися на описі методів та способів апроксимації та застосування математичної оптимізації для оцінки параметрів об'єкта для побудови автономної системи керування, яка може бути стійкою до впливу зовнішніх чинників.

Робота [9] описує концепцію побудови системи керування, зв'язку та стикування для АБПА які здійснюють наукові місії великої автономності. Така система враховує досвід побудови систем керування та зв'язку АБПА важкого класу які засновані на використанні гідроакустичних принципів. В основі запропонованої системи керування лежить децентралізована структура розташування гідроакустичних маяків. Розглядається скоординована взаємодія маяків, яка дозволяє вирішити весь спектр завдань, які ставляться перед об'єктом. Автори [9] вважають, що така система є актуальною при інтеграції значної кількості різноманітних функціональних модулів, у тому числі створених різними виконавцями.

У роботі [10] досліджуються алгоритми рухом плоско-паралельним та просторовим переміщеннями АБПА. Розглядаються та наводяться відомості про способи планування траєкторії для відомих статичних перешкод: А*-алгоритм, генетичні алгоритми, диференційна еволюція, алгоритми «мурашиної колонії» та для невідомих перешкод: нейромережі, алгоритми нечіткої логіки, машинне навчання, алгоритми глибокого навчання, алгоритми навчання із підкріпленням. У дослідженні авторами [10] наведено елементи кінематики апарата та розглянуто можливі випадки траєкторій руху апарата. Також у дослідженні [10] розглядаються кожен із наведених алгоритмів побудови та планування траєкторії руху та способи обминання перешкод, які можуть трапитися під час руху апарата у водному просторі. Автори дослідження [10] наводять широкий список використаних джерел, що показує актуальність дослідження та розробки автономних систем визначення просторового положення та місцезнаходження, а також дослідження та розробка автономної системи керування АБПА.

Критичний аналіз проведених досліджень

Наведені вище дослідження мають вагомe значення для подальшого розвитку та вдосконалення вже існуючих систем керування, які побудовані чи можуть бути побудовані із використанням МЕМС технологій. Однак, у наведених дослідженнях майже не наводиться порівняння характеристик точності досліджуваних системи із точносними характеристиками існуючих та розроблених раніше систем чи систем, які досліджувалися раніше та мають певні результати, не обґрунтовано вибір того чи іншого алгоритму або підходу впровадження керування, а також, майже не проводилися дослідження алгоритмічної точності керування та алгоритмічної швидкодії саме для багатоцільових маневрових об'єктів, які мають складну

динаміку руху. Для практичних досліджень не обґрунтовано вибір чутливих елементів на яких побудована система та не наведено апаратні рішення які могли б бути чи можуть застосовуватися для обраного алгоритму керування, не обґрунтовано вибір конструкції та описання переваг такого вибору і опис динаміки об'єкта із обраною конструкцією. У роботах, які пов'язані безпосередньо із досліджуванням систем для багатоцільових швидкісних та маневрових АБПА зі складною динамікою не зазначено, як розроблена система із застосуванням обраного алгоритму впливає на тактико-технічні характеристики АБПА та не зазначено, які функціональні можливості здобуває система, а також не наведено, які функціональні можливості можуть бути досягнені АБПА із використанням досліджуваної системи. Також, для швидкісних та маневрових АБПА майже не розглядається вплив визначених вихідних величин суміжних системи на якість керування та їх вплив і використання для досягнення заданої точності у системі керування.

Виклад основного матеріалу (дослідження)

Критичний аналіз проведених раніше досліджень має вагоме значення для формування подальших досліджень та показує прогалини, які необхідно дослідити та усунути.

Так, деякі прогалини дослідження апаратно-технічних аспектів систем керування АБПА заповнюються дослідженнями [11 - 16]. Автори [11 - 16] проводять аналіз існуючих систем керування, їхнього апаратного забезпечення та недоліків, які із ним пов'язані. Дослідження [11] наводить організацію керування АБПА на основі відомих систем а також перспективних систем на основі інтелектуальної системи із застосуванням мікроелектромеханічних елементів (МЕМС) [12]. Дослідники [12] описують не тільки традиційні МЕМС сенсори такі як акселерометри та гіроскопи, але і наводять оптичні МЕМС системи (камери, лінзи), які можуть бути використані для побудови та розробки системи автономної оптичної навігації із алгоритмами розпізнавання образів (перешкод), а отримані дані можуть бути використані як частина інтелектуальної системи, яка застосовує елементи глибокого навчання та навчання із підкріпленням [10] для побудови оптимальної траєкторії руху та здійснення оптимального керування. Однак, можуть бути системи, які показали гарні характеристики та надійність під час експлуатації, із аналоговими датчиками та аналоговою вихідною інформацією. У такому випадку застосування інтелектуальних систем керування стає маломожливим. Роботи [13 – 15] показують варіант застосування спеціального пристрою, який дозволяє підключати різні системи та/або датчики із аналоговою вихідною інформацією та конвертувати її у цифрову кодову послідовність. Прилад описаний у [13, 14] надає змогу перейти від аналогового керування до цифрового із мінімальними змінами у складі та структурі загальної системи об'єкта. Так може бути реалізовано цифровий автопілот [15] або цифрове керування курсом підводного апарата, який у своєму складі містить аналогову систему керування рушіями. Дослідження [16] описує апаратно-програмні комплекси, які можуть використовуватися для побудови та розробки системи керування, орієнтації та навігації для підводних апаратів. Однак недоліком розглянутих та запропонованих систем є їхня відкритість та проблематика протоколів інформаційної взаємодії. Так, для забезпечення комбінованого керування наприклад підрулюючими рушіями та рульовими гідродинамічними поверхнями необхідно створювати власний тип апарата та заносити його у базу даних, або шукати вже подібне та розроблене та імплементувати знайдений результат у програмне забезпечення – такі дії можуть призвести до помилок та відповідних проблем які можуть виникнути під час безпосередньої експлуатації та під час розробки прототипу, що призведе до збільшення часу на відлагодження програми та виявлення усіх «багів».

Для забезпечення ефективної експлуатації багатоцільового маневрового АБПА пропонується проводити дослідження системи керування, на основі моделювання динаміки руху апарата для різних, за параметрами та траєкторією, режимів руху, розробити алгоритми адаптивного керування об'єктом, дослідити та вдосконалити або поліпшити систему орієнтації та навігації, побудовану на основі мікроелектромеханічних датчиків. Використання відомих методів, підходів та засобів керування пропонується доповнити розробленими методами обробки та фільтрації сигналів та корегування коефіцієнтів передатних функцій в залежності від показань датчиків у процесі їх функціонування. Для адаптивного керування можуть бути розроблені алгоритми на основі нечіткої логіки та/або нейронних мереж із застосуванням систем машинного та комп'ютерного зору та методів розпізнавання образів та побудови траєкторії руху. Відомі алгоритми керування пропонується доповнити методами прогнозу та корекції на основі імовірнісного підходу та/або нейронних мереж.

На рисунку 1 наведено інформаційно-структурну модель розробки системи автоматичного керування багатоцільовим маневровим АБПА.

Інформаційно-структурна модель задає послідовність визначення вагомих параметрів та характеристик АБПА. Початком дослідження є визначення типу конструкції апарата і зважаючи на конструктивні особливості проводиться розрахунок гідродинамічних коефіцієнтів. Отримані гідродинамічні коефіцієнти застосовуються для моделювання рівнянь руху апарата, які описують динаміку руху апарата у водному середовищі. Розв'язання математичної моделі дає змогу отримати такі результати:

1. Зміну кутів атаки та ковзання від заданих гідродинамічних коефіцієнтів та заданої швидкості руху;

2. Систему диференціальних рівнянь, які описують кінематику та динаміку АБПА у відповідності до заданої траєкторії руху;

3. Побудову системи керування на основі отриманих диференціальних рівнянь із впровадженням у цю систему контурів зворотного зв'язку та регуляторів, із можливістю зміни коефіцієнтів регуляторів та дослідження характеристик керування.



Рис. 1 Інформаційно-структурна модель розробки САК АБПА

Отримані результати на етапі математичного моделювання динаміки руху АБПА далі використовуються для розробки та розрахунку коефіцієнтів передатних функцій керування. Вихідні сигнали передатних функцій приймаються системою, яка моделює рушійно-рульовий комплекс АБПА, який викликає необхідну зміну просторового положення апарата. Зміна просторового положення фіксується та реєструється системою визначення орієнтації та навігації, тобто визначаються поточні координати місцеположення та кути просторового положення відносно обраної базової системи координат. Вихідна інформація системи визначення орієнтації та навігації зворотнім зв'язком поступає на блок моделювання динаміки руху апарата для уточнення коефіцієнтів керування та покращення точності і якості керування АБПА.

Узагальнено та із урахуванням сучасних та розглянутих алгоритмів автономного керування схему керування можна зобразити функціональною діаграмою зображеною на рисунку 2.

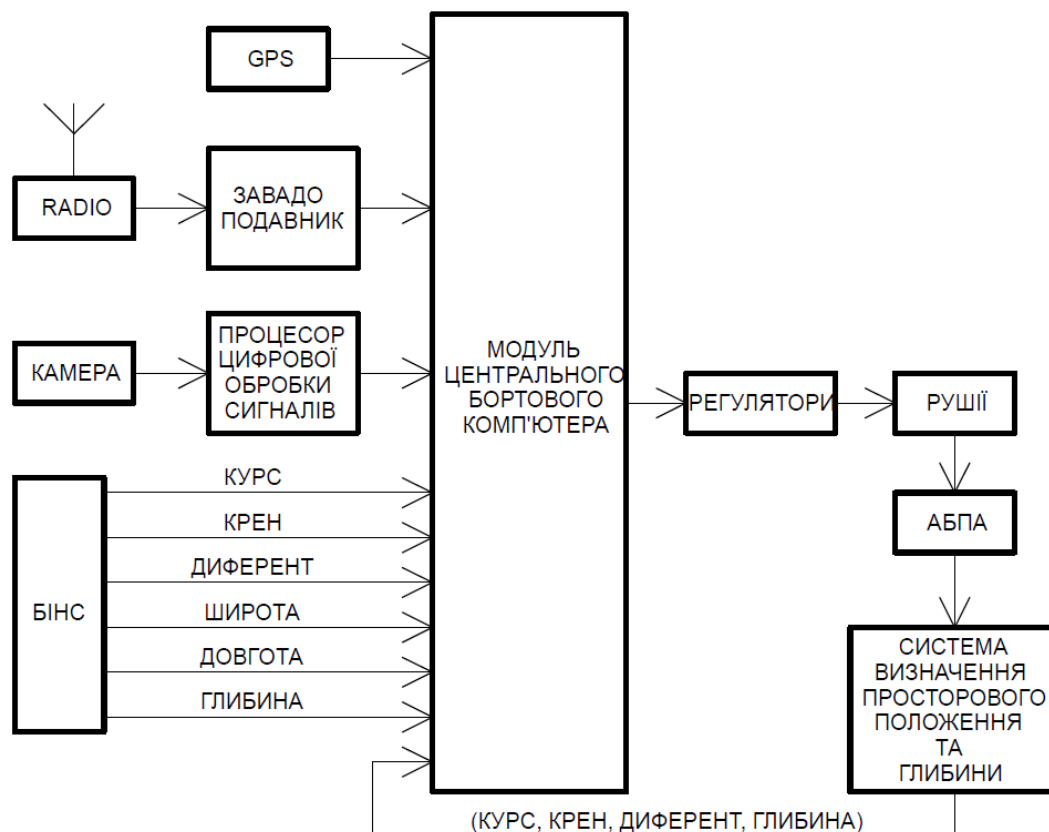


Рис. 2 Функціональна схема системи автоматичного керування АБПА

Функціональна схема, яка зображена на рисунку 2 відображає не тільки застосування інерціальних навігаційних систем але і систем GPS, для корекції місцеположення під час «виринання», систем далекого радіозв'язку для передачі вагомих даних під час довготривалих місій знаходячись на глибині достатній для передачі радіосигналу та камери із спеціалізованим процесором цифрової обробки, для автономної навігації в умовах радіозавад (на значній глибині) та відсутності супутників. Також застосування камери та процесора цифрової обробки сигналів дозволить використовувати алгоритми машинного зору, які розглянуті у [10], для маневрування та долавання перешкод під час виконання місій.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальшого розвитку у даному напрямі

Проведені раніше дослідження мають вагоме значення для розвитку теорії автоматичного керування рухомими автономними та маневровими об'єктами підводного типу. Однак, більшість досліджень пов'язані зокрема із застосуванням відомих методів та підходів базуючись на академічній теорії керування, яка не враховує конструкційні особливості апарата та частково враховує динаміку руху апарата.

Пропонований підхід дослідження системи автоматичного керування дозволить враховувати не тільки динаміку руху, але і враховувати конструктивні особливості апарата, які впливають на гідродинамічні коефіцієнти, визначення параметрів руху у залежності від отриманих значень гідродинамічних коефіцієнтів та застосування параметрів орієнтації та навігації, як інформацію зворотного зв'язку для покращення точності та якості керування апаратом. А також, надасть змогу правильно підібрати апаратно-програмне забезпечення або розробити власне апаратно-програмне забезпечення та правильно підібрати та впровадити чутливі елементи систем керування, орієнтації та навігації, які виготовлені на MEMS технологіях.

Література

1. Wang J., Wu Z., Dong H., Tan M., Yu J. (2022). Development and Control of Underwater Gliding Robots: A Review. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 9(9), 1543-1560, <https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105671>
2. Бурау Н.І., Яцко Л.Л., Расулов М.Д., Бобрик В.С. Огляд стану сучасних автономних безпілотних підводних апаратів. Вісник інженерної академії України – 2017. – №4 – С. 12 – 17.
3. Liu S., Liu Y., Wang N. Robust adaptive self-organizing neuro-fuzzy tracking control of UUV with system uncertainties and unknown dead-zone nonlinearity //Nonlinear Dynamics. – 2017. – Т. 89. – №. 2. – С. 1397-1414.
4. Ravell D. A. M., Maia M. M., Diez F. J. Modeling and control of unmanned aerial/underwater vehicles using hybrid control //Control Engineering Practice. – 2018. – Т. 76. – С. 112-122.
5. Sands T., Bollino K. Autonomous underwater vehicle guidance, navigation, and control. Autonomous Vehicles. – 2018.
6. Yan Z. et al. Diving Control of Underactuated UUV Based on Backstepping Upper Bound Sliding Mode Method //2019 Chinese Control Conference (CCC). – IEEE, 2019. – С. 381-385.
7. Zhang W. et al. Path following control for an under-actuated UUV based on adaptive sliding mode control //Int J Robot Autom. – 2017. – Т. 32. – №. 5. – С. 458-470.
8. Li D., Du L. (2021). Auv trajectory tracking models and control strategies: A review. Journal of Marine Science and Engineering, 9(9), 1020, <https://doi.org/10.3390/jmse9091020>
9. Podder T. K., Sibenac M., Bellingham J. G. (2019). Applications and challenges of AUV docking systems deployed for long-term science missions. Monterey Bay Aquarium Research Institute.
10. Cheng C., Sha Q., He B., Li G. (2021). Path planning and obstacle avoidance for AUV: A review. Ocean Engineering, 235, 109355. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109355>.
11. Gurynenko S. O. Organizaciya system keruvannya suchasnyh bezpilotnyh pidvodnyh aparativ: tezy dop. na XIV Vseukr. nauk.-prakt. konf. studentiv, aspirantiv ta molodyh vchenykh "POGLYAD U MAIBUTNYE PRYLADOBUDUVANNYA", Kyiv, 2021, pp. 34-37
12. Gurynenko S. O., Systema avtomatychnogo keruvannya avtonomnym bezpilotnym pidvodnym aparatom na osnovi microelectromechanichnykh system, Choturnadcyata mignar. nauk.-prakt. konf. Integrovani intelektualni robototekhnichni komplekxy (IPTK-2021), Kyiv, 2021, pp. 19-21.
13. Gurynenko S. Universal Information Transducer as part of multi-purpose control system. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2021. Pp. 106-109. URL: <https://sci-conf.com.ua/ii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-129-science-innovations-and-education-problems-and-prospects-15-17-sentyabrya-2021-goda-tokio-yaponiya-arhiv/>
14. Gurynenko S. O., THE CONCEPT OF UNIVERSAL INFORMATION TRANSDUCER AS AN ELEMENT OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS/S. O. Gurynenko// Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University". Series: Technical Sciences. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/03>.
15. Gurynenko S. The way of autonomous unmanned underwater vehicle autopilot digital control synthesis. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo,

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

16. GURYNNENKO S. "HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX OF AUTONOMOUS UNMANNED UNDERWATER VEHICLE: OVERVIEW". MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES, no. 1, Mar. 2023, pp. 123-9, doi:10.31891/2219-9365-2023-73-1-17.

References

1. Wang J., Wu Z., Dong H., Tan M., Yu J. (2022). Development and Control of Underwater Gliding Robots: A Review. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 9(9), 1543-1560, <https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105671>
2. N. I. Bouraou, L. L. Yatsko, M. D. Rasulov, and V. S. Bobrik, "Review of the state of modern autonomous unmanned underwater vehicles," Bull. Eng. Academy Ukraine, no. 4, pp. 12-17, 2017..
3. Liu S., Liu Y., Wang N. Robust adaptive self-organizing neuro-fuzzy tracking control of UUV with system uncertainties and unknown dead-zone nonlinearity //Nonlinear Dynamics. – 2017. – T. 89. – №. 2. – C. 1397-1414.
4. Ravell D. A. M., Maia M. M., Diez F. J. Modeling and control of unmanned aerial/underwater vehicles using hybrid control //Control Engineering Practice. – 2018. – T. 76. – C. 112-122.
5. Sands T., Bollino K. Autonomous underwater vehicle guidance, navigation, and control. Autonomous Vehicles. – 2018.
6. Yan Z. et al. Diving Control of Underactuated UUV Based on Backstepping Upper Bound Sliding Mode Method //2019 Chinese Control Conference (CCC). – IEEE, 2019. – C. 381-385.
7. Zhang W. et al. Path following control for an under-actuated UUV based on adaptive sliding mode control //Int J Robot Autom. – 2017. – T. 32. – №. 5. – C. 458-470.
8. Li D., Du L. (2021). Auv trajectory tracking models and control strategies: A review. Journal of Marine Science and Engineering, 9(9), 1020, <https://doi.org/10.3390/jmse9091020>
9. Podder T. K., Sibenac M., Bellingham J. G. (2019). Applications and challenges of AUV docking systems deployed for long-term science missions. Monterey Bay Aquarium Research Institute.
10. Cheng C., Sha Q., He B., Li G. (2021). Path planning and obstacle avoidance for AUV: A review. Ocean Engineering, 235, 109355. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109355>.
11. Gurynenko S. O. Organizaciya system keruvannya suchasnyh bezpilotnyh pidvodnyh aparativ: tezy dop. na XIV Vseukr. nauk.-prakt. konf. studentiv, aspirantiv ta molodyh vcheny "POGLYAD U MAIBUTNIE PRYLADOBUDUVANNYA", Kyiv, 2021, pp. 34-37
12. Gurynenko S. O., Systema avtomatychnogo keruvannya avtonomnym bezpilotnym pidvodnym aparatom na osnovi microelectromechanichnyh system, Choturnadcyata mignar. nauk.-prakt. konf. Integrovani intelektualni robototekhnichni komplekxy (IIPTK-2021), Kyiv, 2021, pp. 19-21.
13. Gurynenko S. Universal Information Transducer as part of multi-purpose control system. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2021. Pp. 106-109. URL: <https://sci-conf.com.ua/ii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-129-science-innovations-and-education-problems-and-prospects-15-17-sentyabrya-2021-goda-tokio-yaponiya-arhiv/>
14. Gurynenko S. O., THE CONCEPT OF UNIVERSAL INFORMATION TRANSDUCER AS AN ELEMENT OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS/S. O. Gurynenko// Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University". Series: Technical Sciences. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/03>.
15. Gurynenko S. The way of autonomous unmanned underwater vehicle autopilot digital control synthesis. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2022. Pp. 21-27. URL: <https://sci-conf.com.ua/ix-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiyascience-innovations-and-education-problems-and-prospects-6-8-aprelya-2022-godatokio-yaponiya-arhiv>
16. GURYNNENKO S. "HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX OF AUTONOMOUS UNMANNED UNDERWATER VEHICLE: OVERVIEW". MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES, no. 1, Mar. 2023, pp. 123-9, doi:10.31891/2219-9365-2023-73-1-17.