

**ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ**

УДК 519.71+629.051+621.398

**АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ  
БАГАТОЦІЛЬОВОГО АВТОНОМНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ПІДВОДНОГО  
АПАРАТА ЗІ СКЛАДНОЮ ДИНАМІКОЮ РУХУ***Бурау Н. І., Гуриченко С. О.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: [stas.guryenko@ukr.net](mailto:stas.guryenko@ukr.net)*

*Оглядом статтю присвячено аналізу систем керування автономними безпілотними підводними апаратами, які відносяться до робототехнічних підводних комплексів і використовуються для забезпечення пошукових та глибоководних аварійно-рятувальних робіт, обстеження різноманітних підводних об'єктів (магістральних трубопроводів, донних споруд, корпусів суден тощо), проведення наукових океанографічних досліджень, моніторингу морського середовища. У роботі розглянуто наукові літературні джерела, в яких наведено результати розробок та досліджень систем орієнтації, навігації та керування рухом багатоцільових автономних безпілотних підводних апаратів зі складною динамікою руху, зокрема при виконанні місії в обмеженому просторі з рухом за складними траєкторіями. Особливу увагу зосереджено на таких режимах руху апаратів, як відстеження траєкторії, відслідковування (дотримання) шляху, відстеження точки шляху. Проведено аналіз засобів навігації та керування, які можуть бути використані для забезпечення різних режимів руху, а також розглянуто напрямки розвитку як самих безпілотних підводних апаратів, так і систем керування ними.*

*Для обґрунтування розробки системи керування багатоцільовим маневреним автономним апаратом класу міні сформульовано основні вимоги, для забезпечення яких запропоновано проводити синтез і дослідження системи керування на основі моделювання динаміки руху міні-апарата для різних за параметрами та траєкторією режимів руху, розробити алгоритми адаптивного керування апаратом, вдосконалити систему орієнтації та навігації, побудовану на основі MEMS датчиків. Запропоновано та обґрунтовано інформаційну модель процесу розробки, яка задає послідовність визначення вагомих параметрів і характеристик апарату та виконання важливих етапів синтезу та аналізу системи керування.*

***Ключові слова:** автономний безпілотний підводний апарат; система автоматичного керування; системи орієнтації та навігації.*

**Вступ**

Розвиток сучасних систем керування рухом у просторі відбувається в умовах підвищення вимог до ефективності виконання об'єктом основних цільових задач, що забезпечується відповідністю параметрів і характеристик руху встановленим/потрібним значенням. Водночас, підвищуються вимоги до показників надійності, терміну функціонування та характеристик енергоефективності. Розвиток безпілотної підводної робототехніки вимагає від розробників та дослідників завдання пошуку нових підходів до керування рухом та забезпечення тривалої автономної роботи безпілотного підводного апарата (БПА), особливо для апаратів багатоцільового призначення. Складність та ефективність розв'язання задач керування БПА в багатьох випадках залежить від низки факторів, серед яких можна виділити [1, 2]: цільове призначення БПА та ступінь його автономності; особливості конструкції та масо-габаритні характеристики;

склад та функціональні можливості систем життєзабезпечення; вимоги маневреності; склад та функціональні можливості обладнання для орієнтації, навігації, керування.

В загальному випадку БПА можна розділити на два основні класи [1, 2]. До першого відносяться неавтономні, у тому числі телекеровані БПА, пов'язані з носієм (судном, підводним човном, підводним апаратом) за допомогою кабель-троса, за яким передається електроживлення або сигнали керування, а також відбувається обмін інформацією. До другого класу відносяться автономні безпілотні підводні апарати (АБПА), які не пов'язані з носієм кабель-тросом та здатні переміщуватися, занурюватися та спливати самостійно, наприклад, за заданою програмою. Автономні апарати для виконання своїх місій практично не потребують взаємодії з оператором базової станції чи носія, та відрізняються підвищеною маневреністю через відсутність кабель-тросу. Тому, зважаючи на такі

переваги, саме АБПА обираються для місій в складних, динамічних і небезпечних підводних середовищах. Для таких місій системи керування АБПА повинні забезпечувати властивість високого маневрування в обмежених зонах середовища, тому такі апарати відносяться до гідробатичних і є високоефективними як за характеристиками дальності та швидкості, так і за характеристиками маневреності [3, 4]. Це, в свою чергу, вимагає оснащення АБПА точними та швидкісними системами керування, стійкими до перешкод та невизначеностей, здатними комплексно вирішувати проблеми орієнтації, навігації та забезпечення складної динаміки руху апарата у відповідності до поставлених задач.

Сучасні розробки систем керування багатоцільовими АБПА зі складною динамікою руху вимагають нових підходів до їх синтезу, комплексного застосування інтегрованих малогабаритних засобів вимірювання, мікросистемної техніки та інформаційних технологій. Якісне розв'язання завдань розробки систем керування АБПА з високими показниками якості та розширеними функціональними можливостями передбачає створення спеціального методичного та інформаційно-програмного забезпечення на основі математичних моделей, імітаційного моделювання та чисельного дослідження.

Метою роботи є аналіз стану та перспектив розвитку сучасних систем керування, а також обґрунтування комплексного підходу до розробки системи керування багатоцільовими АБПА зі складною динамікою на основі використання, вдосконалення та подальшого розвитку методів безплатформової інерціальної технології, обробки сигналів, ідентифікації, прогнозування та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

### **Огляд стану та перспективи розвитку систем керування БПА**

Аналіз методів та засобів навігації та керування для автономних безпілотних підводних апаратів наведено в монографії [5]. Зважаючи на високу ймовірність виконання АБПА прихованих місій, у роботі розглядаються навігаційні системи, побудовані на основі кількох багаторежимних високоточних датчиків з відповідним алгоритмічним забезпеченням для фільтрації та обробки навігаційної інформації. Як приклад, до складу системи входить кільцевий лазерний гіроскоп, інерціальна навігаційна система та доплерівський вимірювач швидкості, для обробки використовується фільтр Калмана. Для забезпечення потрібної точності навігації вимагається оновлення даних за показаннями супутникових засобів навігації (GPS), але це вимагає вихід АБПА на поверхню, що ставить під загрозу прихованість місії. Для забезпечення обмеженої похибки навігації без залучення зовнішніх навігаційних засобів запропоновано викорис-

тання технологій нетрадиційної навігації (йдеться про датчики для вимірювання магнітного та гравітаційного поля Землі), які спрямовані на досягнення інтегрованої кореляції з геофізичними даними, використовуючи попередні знання про оперативну зону експлуатації АБПА.

В монографії [6] питанням навігації та керування АБПА присвячено окремий розділ, в якому детально розглянуто можливі види руху апаратів при виконанні місій та завдання систем їх забезпечення. Так, для АБПА зі складною динамікою, типовим є маневр для уникнення перешкод. Для цього бортова система навігації та керування повинна мати здатність генерувати майже оптимальні траєкторії маневру в режимі реального часу, що особливо важливо під час руху в захищених середовищах (наприклад, у водоростях або коралових рифах), в обмежених водних просторах чи при виконанні маневрів над рельєфними поверхнями морського дна. Зазвичай для таких завдань у системах керування використовується гідролокаційні системи та генератори траєкторій, які генерують еталонні траєкторії у вигляді відповідного виразу для кожної координати просторової кривої шляху, та обчислюють коефіцієнт змінювання швидкості у часі для проходження цієї кривої. Використовуючи ці вирази як опорні траєкторії, у контролері обчислюються потрібні значення швидкості повороту та швидкості змінювання тангажу, необхідні для керування апаратом вздовж потрібної траєкторії (такий режим руху називається режимом відслідковування траєкторії).

Принципи, методи та засоби ефективної за фінансовими витратами навігації (cost effective navigation) АБПА розглядаються та аналізуються в дисертації [7]. Особливу увагу зосереджено на принципах інерціальної навігації, розглянуто визначення місцеположення на основі використання акселерометрів і гіроскопів середнього класу точності, та фільтрів Калмана. Виконано експериментальні дослідження інерціальної навігаційної системи, розглянуто методи компенсації зміщення та корекції дрейфу гіроскопів.

Аналіз і синтез систем навігації та керування АБПА для реалізації різних режимів руху досліджені у [8]. Спочатку система орієнтації та наведення АБПА генерує бажану траєкторію з поточного положення апарату до бажаного положення (з урахуванням перешкод). Структура системи керування повинна забезпечити реалізацію законів керування для таких режимів руху, як: відстеження траєкторії (Trajectory Tracking); відслідковування (дотримання) шляху (Path-Following); відстеження точки шляху (Way Point Tracking). Для режиму відстеження траєкторії система керування повинна забезпечити рух маршрутом, який має чітко визначені координати положення у часі, що обумовлює ускладнення закону керування та пристрою керування для його реалізації. В режимі відслідкову-

вання шляху розглядається весь шлях без будь-яких обмежень часових параметрів, траєкторія задається геометричним описом, і апарат повинен відслідковувати саме геометричну форму траєкторії, коли його рух сходиться до цієї траєкторії. Тому закон керування розроблюється таким чином, щоб спрямовувати апарат на бажаний шлях. Режим відстеження точки шляху відрізняється від попередніх тим, що серія шляхових точок розміщується між фактичним положенням АБПА та його бажаним положенням, а керування апаратом формується і реалізується від точки до точки таким чином, щоб він досяг бажаного положення за зазначеними маршрутними точками. Повна математична модель, яка описує динаміку АБПА, є нелінійними рівняннями руху із пов'язаними та нелінійними членами, що включають додану масу, гідродинамічне демпфування та зовнішні збурення середовища. Тому для реалізації зазначених вище режимів руху пропонується використання нелінійних регуляторів, наприклад, на основі нечіткої логіки тощо. До складу апаратного забезпечення системи входять: інерціальний вимірювальний блок для визначення положення та розрахунку швидкості, який складається з тривісних акселерометра (ADXL-345), гіроскопа (ITG-3200) та магнітометра (HMC5883L); вбудований мікроконтролер (ATmega328), в якому дані від датчика калібруються з використанням фільтрації Калмана для оцінки положення та швидкості АБПА; датчик тиску для вимірювання глибини апарату; доплерівський вимірювач швидкості для вимірювання вектору швидкості АБПА; ехолот; GPS-приймач, який можна використовувати, коли АБПА знаходиться поблизу поверхні води.

У роботі [9] досліджується можливість підвищення точності керування АБПА у горизонтальній площині на основі методу адаптивного керування у ковзному режимі із застосуванням граничних шарів для відслідковування траєкторного положення апарату за кутом курсу. У відповідності до запропонованого методу автори 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.

Дослідження [10] присвячено вирішенню проблеми керування зануренням (зміни глибини) БПА в режимі відслідковування шляху з урахуванням впливу на апарат зовнішнього середовища. Автори розглядають поєднання традиційного зворотньокрокового методу з ковзним режимом керування. Керування зміною глибини розглядається як зворотньокроковий метод із ковзною верхньою

границею. Автори роботи беруть за основу рівняння руху апарату у вертикальній площині (тобто зміну глибини), 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.

Результати моделювання та керування безпілотним транспортним засобом із середнім ступенем здатності виконувати безперервну роботу в повітрі та/або під водою представлено у статті [11]. Неперервна динаміка об'єкта моделюється формалізмом Ньютона-Ейлера із урахуванням ефектів плавучості та ефектів опору, якими зазвичай нехтують у дослідженнях і повітряних, і підводних об'єктів. Система керування базується на використанні гібридного контролера, призначенням якого є відслідковування траєкторії руху об'єкта із урахуванням сигналів повної системи, яка представляє собою гібридну систему замкненого циклу, а також стратегію забезпечення перемикання між повітряним та водним середовищами. Ефективність такої системи у роботі перевіряється та підтверджується результатами моделювання розробленої експериментальної платформи, яка відпрацьовувала сигнали системи керування у повітрі, під водою та під час переходу від одного середовища експлуатації до іншого.

Метод автономної навігації для АБПА на основі інформаційних фільтрів із застосуванням одночасної локалізації та картографування (simultaneous localization and mapping - SLAM) запропоновано та досліджено в [12]. Автори використовують розширений інформаційний фільтр (extended information filter - EIF) та обґрунтовують видалення деяких ланок в інформаційній матриці, чим досягається розріджений алгоритм SLAM. Усі основні формули оновлення можуть бути реалізовані постійно у часі незалежно від розміру карти; тим самим значно знижується обчислювальна складність. У якості активного сенсора для АБПА використовується механічний скануючий ехолот, а метод компенсації ґрунтується на зворотному зв'язку положення апарату для подолання спотворення акустичних зображень внаслідок його руху. Доплерівський вимірювач швидкості використовується для визначення швидкостей апарату відносно морського дна, крім того, лаг NavQuest600, який використовується в дослідженнях, може надавати іншу інформацію (кут нахилу, кут крену, значення курсу, глибини, температури та швидкості відносно океанських течій тощо). В якості датчиків кута використовуються недорога інерціальна навігаційна система AHRS M2 (для отримання інформації про положення) та гіроскоп VG951D –

для вимірювання кутової швидкості в процесі навігації АБПА. Крім зазначених сенсорів, АБПА містить високоточний і високодинамічний приймач GPS. Результати проведених експериментальних досліджень показують, що запропонований навігаційний підхід на основі розрідженого алгоритму SLAM покращує точність навігації порівняно зі звичайним методом; крім того, алгоритм має низьку обчислювальну вартість порівняно з розширеним алгоритмом фільтра Калмана.

Як один з напрямків сучасних розробок маневрених АБПА, у статті [13] наведено результати розробки та порівняльного аналізу 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, що можуть містити гармонічні складові, оцінюють вихідні величини та як кожна методика визначає необхідні величини у випадку наявності підводних перешкод, якими у цьому дослідженні є підводні міни. Навігація апарату реалізується у режимі відслідковування за точкою шляху, щоб направляти АБПА уздовж заздалегідь запланованого маршруту через поле перешкод, розміщених у випадкових місцях.

Узагальнену структуру комплексу орієнтації та навігації з гідроакустичною станцією для АБПА наведено у статті [14]. Отже, на прикладі апарату HUGIN 3000 аналізують склад та принцип роботи навігаційного комплексу, до складу якого входять: безплатформова інерціальна навігаційна система; доплерівський вимірювач швидкості; акустична система; глибиномір (ехолот); обчислювальний модуль для визначення місцеположення, параметрів орієнтації, швидкості.

Як перспективний напрямок розвитку систем керування в роботі [15] обґрунтовано реалізацію стійкої адаптивної самоорганізаційної схеми нейро-нечіткого керування (robust adaptive self-organizing neuro-fuzzy control – RASNFC) для відстежування безпілотного підводного апарата з невизначеностями та нелінійними мертвими зонами. Запропонована схема RASNFC містить в собі адаптивний контролер, до складу якого входить самоорганізаційна нейро-нечітка мережа (self-organizing neuro-fuzzy network – SNFN) і стійкий до зовнішніх впливів контролер. Адаптивний контролер сконструйовано з ковзним режимом для забезпечення необхідного закону керування основи, також забезпечується ідентифікація невідомої динамічної функції за допомоги апроксиматора SNFN, здатного самостійно побудувати нейро-нечітку мережу з динамічною структурою внаслідок генерування та обмеження нечіткого правила. Стійкий до зовнішніх впливів контролер використовується для забезпечення властивості коефіцієнту підсилення адаптуватись до можливих помилок

відновлення інформації, завдяки чому підвищується стійкість всієї замкненої системи керування. Теоретичний аналіз та результати досліджень свідчать про те, що відстежування похибок є асимптотично стабільним, а всі сигнали у замкненій системі – обмежені.

Робота [16] розглядає нову структуру моделювання, в якій використовується розширений фільтр Калмана для оцінки положення, напрямку (курсу) та зміщення нуля гіроскопа системи визначення просторового положення, побудованої на недорогих інерційних датчиках, які відносяться до типу мікроелектромеханічних систем (MEMS-датчики). Алгоритм, розроблений для точної оцінки просторового положення та напрямку руху, враховує наявність зовнішніх збурень, у тому числі прискорень об'єкта та магнітних девіацій. У дослідженні на основі системи визначення просторового положення (інерціальної навігаційної системи AHRS) та динамічної моделі руху автономного підводного апарата було розроблено недорогу модель системи навігації. Ефективність алгоритму оцінюється за результатами експериментальних випробувань при різному прискоренні та наявності зовнішніх магнітних збурень. Результати визначення кутів орієнтації оцінюються за середніми похибками, отримані результати вказують на те, що за допомогою розробленого підходу та під час відключеного GPS, відносна похибка навігації становить 8 % від пройденої відстані.

Точність визначення параметрів орієнтації та навігації, ефективність керування АБПА залежать від датчиків та систем вимірювання, а також від алгоритмів обробки даних. На сьогодні сенсорна технологія є предметом інтенсивних досліджень і постійного прогресу [17]. У загальному випадку [1, 2], БПА мають різні вагу та розміри, корисне навантаження, експлуатуються на різних глибинах та при різних типах і характеристиках руху, призначені для виконання конкретних завдань, які можуть потребувати різної кількості, типів і комбінацій датчиків. Ці датчики можна монтувати різними способами, а вимірювану інформацію можна обробляти за допомогою різних спеціальних методів обробки даних. Тому важливим завданням при розробці систем керування АБПА є підбір та обґрунтування застосування датчиків, які за своїми характеристиками будуть оптимальними для завдань конкретної місії апарату в реальних умовах експлуатації та взаємодії з навколишнім середовищем. На відміну від інших мобільних роботів, АБПА завдяки послаблюючій дії води не використовують сигнали GPS, коли не спливають на поверхню. Основними датчиками інформації для таких апаратів є акустичні датчики, оптичні датчики, інерціальні навігаційні системи або різні комбінації датчиків для навігації, відстеження цілі та траєкторії [17]. Так, інерціальна навігаційна система використовується для позиціонування та визна-

чення курсу АБПА, але висока точність забезпечується при використанні системи лише протягом короткого періоду часу. Тому доцільно використовувати комплексування датчиків (дані інерціальної системи можна об'єднати з даними, що надходять від інших датчиків, наприклад, доплерівського вимірювача швидкості), щоб забезпечити точніші вимірювання та визначення необхідних навігаційних параметрів.

Результати, отримані в наведених вище дослідженнях, мають вагомe значення для розробки нових та вдосконалення вже існуючих систем керування АБПА. Однак, розробка конкретного типу підводного апарату вимагає індивідуального підходу до створення його системи орієнтації, навігації, керування. Так, для апаратів класу міні чи мікро [2] доцільно будувати такі системи на MEMS-датчиках, що в кожному конкретному випадку вимагає проведення комплексу досліджень теоретичного та практичного характеру, порівняльного аналізу характеристик системи для різних типів руху, розробки та обґрунтування спеціального та технологічного алгоритмічного й програмного забезпечення. Для багатоцільових швидкісних та маневрових АБПА важливим є аналіз впливу системи навігації та керування на MEMS-датчиках на тактико-технічні характеристики та функціональні можливості апарату, зокрема в складних умовах значного гідравлічного тиску, течій та зміни густини води.

Все це вказує на важливість та актуальність проведення наукових досліджень, спрямованих на підвищення точності, швидкодії, розширення функціональних можливостей систем визначення параметрів орієнтації та навігації, та систем керування рухом АБПА зі складною динамікою, які побудовані на основі MEMS- датчиків.

#### **Обґрунтування розробки системи керування багатоцільового АБПА**

Для забезпечення надійної експлуатації АБПА зі складною динамікою, які відносяться до класу мікро чи міні, необхідно розробити систему орієнтації, навігації та керування з використанням інтегрованих малогабаритних засобів вимірювання (на основі MEMS-датчиків), мікросистемної техніки та технологій, алгоритмічних методів підвищення точності засобів автономної навігації.

З урахуванням досліджень в монографії [18] сформулюємо основні вимоги до такої системи.

- *Забезпечення стійкості, точності та швидкодії:*

це традиційні вимоги до систем автоматичного керування, показники, які повинні забезпечуватись, встановлюються відповідно до запланованої місії. Важливим є розширення функціональних можливостей систем, коли забезпечується виконання декількох місій із заданими значеннями по-

казників якості керування (використання адаптивного, робастного керування тощо);

- *вимоги мініатюризації:*

для мікро/міні апаратів необхідно використовувати елементну базу на основі MEMS технологій. Датчики повинні бути високочутливими, прецизійними, з низьким енергоспоживанням. Для систем навігації та керування можуть використовуватись мікромеханічні гіроскопи, магнітометри, інерціальні вимірювальні модулі, інерціальні навігаційні системи у комплексі з датчиками глибини, доплерівськими вимірювачами швидкості;

- *автономність функціонування:*

ці вимоги обмежують використання систем GPS для оновлення даних інерціальної навігації. Тому розроблювана система повинна бути високонадійною і забезпечувати високу точність навігаційних вимірювань. Для забезпечення високоточної автономної навігації важливим питанням є початкове та поточне в експлуатації калібрування мікроелектромеханічних інерціальних вимірювальних засобів. Особливо важливою ця вимога є для апаратів віддалених та довготривалих місій;

- *гідробатика (висока маневреність):*

властивість високого маневрування в обмежених зонах середовища, висока ефективність як за характеристиками дальності та швидкості, так і за характеристиками маневреності, вимагає оснащення АБПА точними та швидкісними системами керування. Для відслідковування складних траєкторій руху необхідно розробити алгоритми керування з прогнозом та корекцією руху у разі виникнення непередбачуваних ситуацій;

- *інтелектуальна підтримка руху:*

інтелектуалізація систем керування АБПА передбачає використання інтелектуальної архітектури системи, яка називається RVC-модель (Rear View Camera), і складається з системи уникнення зіткнення з перешкодами, автономної навігаційної системи та системи оцінки ризику зіткнення [18]. Крім того, завданнями інтелектуальної підтримки руху можуть бути збір, накопичення, обробка та передача інформації, контроль відповідності моделей процесів та їх реалізацій, прогнозування технічного стану, візуалізації позиціонування об'єктів та їх траєкторій руху, відновлення втрачених фрагментів інформації та траєкторії руху тощо.

Виконання зазначених вимог при розробці системи орієнтації, навігації та керування АБПА є складним завданням і вимагає врахування багатьох факторів. Для його вирішення пропонується проводити синтез і дослідження системи керування на основі моделювання динаміки руху міні-апарата для різних за параметрами та траєкторією режимів руху, розробити алгоритми адаптивного керування апаратом, вдосконалити систему орієнтації та навігації, побудовану на основі MEMS датчиків. Використання відомих методів, підходів та засобів керування пропонується доповнити роз-

робленими методами обробки та фільтрації сигналів та корегування коефіцієнтів передатних функцій залежно від показань датчиків у процесі їх функціонування. Для адаптивного керування можуть бути розроблені алгоритми на основі нечіткої логіки та/або нейронних мереж. Відомі алгоритми керування пропонується доповнити методами про-

гнозу та корекції на основі ймовірнісного підходу та/або нейронних мереж.

На рис. 1 наведено інформаційну модель процесу розробки та дослідження системи автоматичного керування багатоцільовим маневровим АБПА.



Рис. 1. Інформаційна модель процесу розробки та дослідження системи автоматичного керування АБПА

Інформаційна модель задає послідовність визначення вагомих параметрів та характеристик АБПА, виконання важливих етапів синтезу та аналізу системи керування. Початком розробки та 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 надає 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;

Отримані результати на етапі математичного моделювання динаміки руху АБПА далі використовуються для розробки та розрахунку коефіцієнтів передатних функцій функціональних елементів системи керування. Вихідні сигнали системи керування приймаються системою, яка моделює рушійно-рульовий комплекс АБПА, що 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 орієнтації та навігації зворотнім зв'язком надходить на блок моделювання динаміки руху апарата для уточнення коефіцієнтів керування та забезпечення показників точнос-

ті та якості перехідних процесів системи керування АБПА.

#### Висновки

Використання багатоцільових автономних безпілотних підводних апаратів вимагає розробок та постійного вдосконалення й розвитку бортових автономних систем навігації та керування рухом в складних умовах підводного середовища. Проведені раніше дослідження мають вагомий значення для розвитку АБПА та систем їх керування. Вони демонструють високий науково-технічний рівень сучасних розробок, а також окреслюють перспективні напрямки розвитку систем керування з використанням сучасних інформаційних технологій, штучного інтелекту, мікросистемної техніки. Однак, створення маневреного АБПА відповідного класу передбачає розробку систем орієнтації, навігації та керування на основі відомих методів та підходів сучасної теорії керування з урахуванням і конструктивних особливостей апарата, і складної динаміки його руху. Для апаратів класу міні/мікро в якості чутливих елементів необхідно використовувати мікроелектромеханічні датчики, а для забезпечення високої маневреності та розширення функціональних можливостей системи керування таким апаратом на множині складних траєкторій необхідно обґрунтувати, розробити та дослідити ефективність алгоритмів керування.

Запропонований підхід до розробки та дослідження системи автоматичного керування дозволить врахувати не тільки динаміку руху, але й конструктивні особливості апарата, які впливають на гідродинамічні коефіцієнти, визначення параметрів руху залежно від отриманих значень гідродинамічних коефіцієнтів та застосування парамет-

рів орієнтації та навігації, як інформацію зворотного зв'язку для покращення точності та якості керування апаратом.

#### Література

- [1] J. Wang, Z. Wu, H. Dong, M. Tan, and J. Yu, "Development and control of underwater gliding robots: A review", *IEEE/CAA J. Autom. Sinica*, vol. 9, no. 9, pp. 1543–1560, 2022. DOI: 10.1109/JAS.2022.105671
- [2] Н. І. Бурау, Л. Л. Яцко, М. Д. Расулов та В. С. Бобрик, "Огляд стану сучасних автономних безпілотних підводних апаратів", *Вісник інженерної академії України*, № 4, с. 12 – 17, 2017.
- [3] S. Bhat and I. Stenius, "Hydrobatics: a review of trends, challenges and opportunities for efficient and agile under actuated AUVs", *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop*, pp. 1-8., 2018. DOI: 10.1109/AUV.2018.8729805
- [4] S. Bhat, I. Stenius and T. Miao, "Real-time flight simulation of hydrobatic AUVs over the full  $0^{\circ}$  -  $360^{\circ}$  envelope", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 46, no. 4, pp. 1114-1131, 2021. DOI: 10.1109/JOE.2021.3076178
- [5] *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*, Ed. by Gwyn Griffiths, Published by Taylor & Francis, 2003.
- [6] *Autonomous Underwater Vehicles*, Ed. by Nuno A. Cruz, Published by InTech, 2011.
- [7] Ladan Sahafi, "Cost-Effective Navigation of Autonomous Underwater Vehicles", University of Adelaide, 2013.
- [8] Raja Rout, "Control of Autonomous Underwater Vehicles", National Institute of Technology, Rourkela, 2013.
- [9] Z. Yan, Z. Yang, G. Zhang, J. Zhou, X. Pan and L. Yue, "Diving Control of Underactuated UUV Based on Backstepping Upper Bound Sliding Mode Method", 2019 Chinese Control Conference (CCC), Guangzhou, China, 2019, pp. 381-385, DOI: 10.23919/ChiCC.2019.8865195.
- [10] W. Zhang et al., "Path following control for an under-actuated UUV based on adaptive sliding mode control", *Int. J. Robot Autom*, vol. 32, no. 5, pp. 458-470, 2017. DOI:10.2316/Journal.206.2017.5.206-4660
- [11] D. A. M. Ravell, M. M. Maia and F. J. Diez, "Modeling and control of unmanned aerial/underwater vehicles using hybrid control", *Control Engineering Practice*, vol. 76, pp. 112-122, 2018.
- [12] Bo He et al., "Autonomous Navigation for Autonomous Underwater Vehicles Based on Information Filters and Active Sensing", *Sensors*, 11, pp. 10958-10980, 2011. DOI:10.3390/s111110958
- [13] T. Sands, K. Bollino, I. Kaminer, and A. Healey, "Autonomous Minimum Safe Distance Maintenance from Submersed Obstacles in Ocean Currents", *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 6, no. 3, p. 98, Aug. 2018, DOI: 10.3390/jmse6030098.
- [14] В. С. Давидов, В. І. Богом'я, В. В. Демичев, "Принципи побудови сучасних комплексів орієнтації та навігації автономних підводних апаратів з використанням гідроакустичних систем", *Водний транспорт*, вип. 2, № 6, с. 37-41, 2015.
- [15] S. Liu, Y. Liu and N. Wang, "Robust adaptive self-organizing neuro-fuzzy tracking control of UUV with system uncertainties and unknown dead-zone nonlinearity", *Nonlinear Dynamics*, 89, pp. 1397-1414, 2017. DOI:10.1007/s11071-017-3524-z
- [16] M. T. Sabet, H. Mohammadi Daniali, A. Fathi and E. Alizadeh, "A Low-Cost Dead Reckoning Navigation System for an AUV Using a Robust AHRS: Design and Experimental Analysis", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 43, no. 4, pp. 927-939, Oct. 2018. DOI: 10.1109/JOE.2017.2769838.
- [17] E. Balestrieri, P. Daponte, L. De Vito, F. Lamonaca, "Sensors and Measurements for Unmanned Systems: An Overview", *Sensors*, vol. 21, no. 4, pp. 1518-1545, 2021. DOI: 10.3390/s21041518.
- [18] *Underwater Vehicles*, Ed. by A. V. Inzartsev, Published by IntechOpen, London, UK, 2009. DOI: 10.5772/107.

UDC 519.71+629.051+621.398

**N. Bouraou, S. Gurynenko**

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*  
ANALYSIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF A MULTIPURPOSE AUTONOMOUS UNMANNED UNDERWATER VEHICLE WITH COMPLEX MOTION DYNAMICS

The overview article is devoted to the analysis of control systems of autonomous unmanned underwater vehicles, which belong to robotic underwater complexes and are used to provide search and deep-sea emergency and rescue operations, survey of various underwater objects (main pipelines, bottom structures, ship hulls, etc.), conducting scientific oceanographic surveys research, monitoring of the marine environment. The work examines scientific literary sources, which

provide the results of development and research of orientation, navigation and motion control systems of multi-purpose autonomous unmanned underwater vehicles with complex movement dynamics, in particular when performing missions in a limited space with movement along complex trajectories. Special attention is focused on such modes of movement of devices as trajectory tracking, path-following and way point tracking. An analysis of the means of navigation and control, which can be used to ensure different modes of movement, was carried out, as well as the directions of development of both the unmanned underwater vehicles themselves and their control systems were considered.

In order to substantiate the development of a control system for a multi-purpose maneuverable mini-class autonomous vehicle, the main requirements are formulated. It is proposed to conduct a synthesis and research of the control system based on the simulation of the dynamics of the movement of the mini-vehicle for different modes of movement in terms of parameters and trajectories, to develop algorithms for the adaptive control of the vehicle, to improve the system orientation and navigation, built on the basis of MEMS sensors. An information model of the development process is proposed and substantiated, which specifies the sequence of determining important parameters and characteristics of the vehicle and performing important stages of synthesis and analysis of the control system.

**Keywords:** autonomous unmanned underwater vehicle; automatic control system; orientation and navigation systems.

*Надійшла до редакції  
30 листопада 2022 року*

*Рецензовано  
17 травня 2023 року*



© 2023 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).