

УДК 681.5.04

## ПЕРСПЕКТИВНА СТРУКТУРА МАТЕМАТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОНОМНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ОБСТЕЖЕННЯ МОРСЬКИХ ГЛИБИН

**Калініченко Є. В.**, к.т.н., доцент, завідувач кафедри «Навігації і керування судном», Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2898-7313;

**Заєць А. Ю.**, к.т.н., доцент кафедри «Суднобудування і судноремонту ім. проф. Ю. Л. Воробйова», Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: au.lopatnyova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5803-9069.

Метою статті є підвищення ефективності вирішення завдань обстеження морських глибин та виконання різних підводних операцій за рахунок використання перспективного математичного забезпечення автономних підводних апаратів. У статті розглянуті проблеми розробки системи управління для автономних підводних апаратів. Вказано, що існуючі системи управління призначені переважно для вирішення завдань пошукового класу, але автономні підводні апарати можуть використовуватися для виконання складніших завдань, таких як обстеження. Для успішного виконання таких завдань автономним підводним апаратам необхідна система управління, яка може гнучко реагувати на нові завдання та дані від бортових датчиків. У статті запропонована нова архітектура математичного забезпечення системи управління автономними підводними апаратами, яка використовує як ієрархічні, так і поведінкові управлінські структури. Це значно розширює можливості автономних підводних апаратів, дозволяючи йому вирішувати завдання різних класів в умовах обмежень обчислювальних ресурсів бортової обчислювальної мережі. У рамках запропонованої архітектури використовується поведінковий підхід на різних рівнях функціональної ієрархічної системи управління. При цьому управлінські структури виконавчого рівня мають постійний склад, а на тактичному рівні формуються змінні структури, які створюються на основі розробленої бібліотеки агентів. Це забезпечує легке нарощування функціональності по мірі появи нових завдань та апаратних засобів. Обґрунтовано підхід щодо побудови бібліотеки агентів тактичного рівня на основі функціональної декомпозиції цільового класу завдань. Дії робота формуються в термінах агентів, що утворюють бібліотеку, яка забезпечує основу для створення декларативних місії. Розроблена та досліджена структура агента, яка містить локальну модель середовища, засоби планування дій на базі цієї моделі та аналізу використовуваної інформації для визначення працездатності агента. Відповідна система управління може бути запропонована в подальшому для випробування на автономних підводних апаратах.

**Ключові слова:** автономні підводні апарати; поведінкова архітектура; ієрархічна архітектура; гібридна архітектура; координація; конфлікти; надійність; агенти.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.017-028**

**Постановка проблеми.** Автономні підводні апарати (АПА) – це безпечний та ефективний спосіб вивчення морських глибин та виконання різних підводних операцій. Вони широко використовуються по всьому світу для виконання пошукових завдань і завдань обстеження, таких як рятувальні операції, батиметричні вимірювання, моніторинг океанології та екології, а також протимінні заходи. АПА також можуть використовуватися для виконання складних пошуково-дослідницьких завдань, таких як автоматична інспекція підводних комунікацій, пошук джерел екологічного забруднення та виявлення аномалій [1]. Однак такі операції вимагають наявності розвиненої системи поведінки, яка може гнучко реагувати на нові завдання та дані від бортових датчиків.

Особливості роботи АПА, включаючи обмеженість акустичного зв'язку, обмежений вибір датчиків та обмежений доступ до навігаційної системи, вимагають спеціального підходу до управління. Проте широке практичне використання АПА в нових областях обмежене тим, що існуючі системи управління переважно призначені для вирішення завдань пошукового класу. У цьому контексті виникають труднощі у формулюванні завдань та забезпеченні постійного інформаційного зв'язку з оператором [2].

Ключова проблема полягає в недостатності існуючих методів опису завдань та архітектури систем управління загалом, а також їх програмного забезпечення, зокрема, для

завдань обстеження. Це призводить до складнощів у розробці підходів, необхідних для ефективного використання АПА. Крім того, базові аспекти координації кількох операцій під час обстеження потребують додаткової розробки. Важливість вирішення цих проблем та необхідність розробки математичного забезпечення системи управління для виконання операцій обстеження підтверджують актуальність цієї статті. Загалом існує необхідність у створенні підходу до формування поведінки АПА, яка дозволить успішно виконувати операції обстеження класу.

Нехай  $T$  представляє сукупність завдань обстеження морських глибин та підводних операцій. Таким чином, задача полягає у розкладанні сукупності завдань  $T$  на підзадачі  $T_i$ , де  $i$  належить до деякої індексної множини  $I$ , таким чином, щоб оптимізувати ефективність вирішення цих завдань. Нехай  $F(T)$  представляє функцію, яка оцінює загальну складність вирішення сукупності завдань  $T$ . Метою є знайти оптимальний розклад  $T = \bigcup_{i \in I} T_i$ , який мінімізує функцію складності  $F(T)$ , враховуючи внутрішні зв'язки та оптимальну функціональну декомпозицію цільового класу завдань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багато вчених досліджують шляхи підвищення ефективності управління підводними роботами, наприклад, які визначені в роботах [3–9].

У науковому дослідженні [3] розглянуті і проаналізовані сучасні виклики, пов'язані з розвитком підводної робототехніки. Зокрема, дослідження охоплює широкий спектр аспектів, пов'язаних з цією галуззю: від проектування та оптимізації систем до проблем комунікації, використання машинного навчання, картографування, координації та адаптивного планування місій. Ця робота розкриває складність завдань, пов'язаних з підводною робототехнікою, а також намагається відповісти на питання, що стосуються майбутнього розвитку цієї сфери. Підводна робототехніка, як і будь-яка інша наука, постійно вдосконалюється, і дослідження розглядає потенціал наступного покоління підводних роботів. Це дослідження дає можливість зрозуміти, які виклики стоять перед дослідниками та інженерами у сфері підводної робототехніки і, які можливості відкриваються завдяки вдосконаленню технологій. Висвітлюються ключові аспекти, які вимагають уваги, і висувуються ідеї щодо подолання складних технічних викликів, що стоять на шляху до подальшого росту цієї динамічної галузі.

Наукова стаття [4] спрямована на дослідження та аналіз актуальних досягнень у сфері підводної робототехніки, зокрема у контексті застосування штучного інтелекту. Основною метою даного дослідження є здійснення комплексного огляду новітніх розробок, що стосуються використання інноваційних методів штучного інтелекту. Стаття фокусується на важливих аспектах взаємодії підводних роботів з оточуючим середовищем та здатності роботів до самостійної роботи в умовах підводного простору. Одним з ключових напрямів є навчання моделей штучного інтелекту, що дозволяє роботам вчитися на основі накопиченого досвіду та взаємодії з динамічно змінюваним середовищем.

У науковій статті [5] було створено математичну концепцію, яка описує гідродинамічну силу з урахуванням впливу стінки на точне управління і маневреність підводного робота складної геометрії. Автори представили вдосконалену гідродинамічну модель для робота, яка спеціально розроблена для ситуацій, коли взаємодія зі стінкою важлива, але раніше цей аспект часто упускали у розгляді роботів, які діють у водоймах. Спочатку, гідродинамічні коефіцієнти в цій моделі, включаючи в'язкий та інерційний коефіцієнти, були визначені через аналіз стаціонарного та нестаціонарного руху. Використовуючи методи обчислювальної гідродинаміки, була встановлена залежність гідродинамічної сили від відстані до стінки та швидкості руху робота. Також було визначено область впливу стінки на рух робота. Останнім етапом було експериментальне вимірювання гідродинамічних коефіцієнтів в умовах резервуара з циркулюючою водою, враховуючи вплив стінки на гідродинамічну силу. Отримані результати підтвердили точність математичної моделі та надійність використаних методів обчислювальної гідродинаміки. У підсумку, дана стаття розкриває новий підхід до моделювання гідродинамічних взаємодій, що враховують

вплив стінки на рух підводних роботів. Використання обчислювальної гідродинаміки у поєднанні з експериментами дозволило створити точну та надійну математичну модель для дослідження та покращення маневреності та управління цих роботів.

У роботі [6] аналізується амфібійний дослідницький робот сферичної форми, який володіє можливістю ефективного руху як у водному середовищі, так і на суходолі. Він вирізняється гнучкістю переміщення, витримкою від тиску води та можливістю виконувати обертальні рухи з нульовим радіусом повороту. Однак, на основі отриманих практичних результатів експерименту було виявлено, що однією з недоліків цього робота є обмежена максимальна швидкість здійснення стрибків напруги. Ця наукова стаття визначає головну мету – покращення показників максимальної швидкості здійснення стрибків напруги та зменшення небажаних коливань важкого маятника. Автори ставлять перед собою завдання удосконалити робота, щоб він міг досягати більш високих швидкостей під час здійснення руху, особливо у важких умовах напруженості. Це дослідження має значущість, оскільки вдосконалення максимальної швидкості руху та управління стрибками напруги може значно розширити можливості застосування цього амфібійного робота в різних ситуаціях, де швидкість та точність руху є ключовими факторами успішного виконання завдань.

У роботі [7] зроблено критичний огляд сучасних досягнень в автоматизованому плануванні для флоту АПА. Оскільки автоматизоване планування місій для флотів АПА може бути інструментом для зниження складності програмування завдань транспортних засобів та проведення оцінки правильності для цілей, визначених кінцевим користувачем, дозволяючи оператору зосередитися на оцінці ризику.

Роботи [8] та [9] узагальнюють різні стратегії планування шляху для АПА, включаючи метод моделювання, та алгоритм пошуку шляху на основі характеристик підводних середовищ як передбачуваних та непередбачуваних. Аналізуються переваги та недоліки різних методів моделювання та методи моделювання для різних середовищ таких як: методи на основі пошуку геометричної моделі, алгоритми на основі ймовірнісного вибірку, алгоритми на основі штучного потенційного поля та інтелектуальні алгоритми.

У даній статті [10] висвітлено дієву систему управління для автономних підводних роботів. У цьому підході використовується внутрішня оперативна пам'ять для забезпечення надійності замість використання зовнішньої системи управління. Для досягнення кращої стабілізації балансу під час руху робота вперед використовується нечіткий логічний контролер, побудований на основі мікроконтролера. Цей інноваційний підхід має у своєму складі не лише нечіткий пропорційно-інтегральний контролер як наглядча, але також використовується спільно з ним для забезпечення кращої динамічності та стійкості підводних роботів. Під час практичної реалізації були проведені експерименти, що підтверджують ефективність цього підходу. Такий підхід до управління підводними роботами відкриває нові можливості для покращення їхньої продуктивності та надійності. Використання вбудованої оперативної пам'яті та нечіткого логічного контролера є інноваційними кроками в розвитку систем автономного управління, які допомагають забезпечити ефективну та стійку роботу під водою.

У статті [11] було виголошено надійний метод для ефективного управління поведінкою підводного робота, який має п'ять ступенів свободи. Новий підхід включає розробку нового типу двигунів, що можуть обертатися на повний оборот, і використання масового перемикача. Ця комбінація дозволяє роботу змінювати свою глибину швидко і легко, зі зменшеними витратами енергії, зберігаючи при цьому стабільний баланс.

**Метою статті** є підвищення ефективності вирішення завдань обстеження морських глибин та виконання різних підводних операцій за рахунок використання перспективного математичного забезпечення автономних підводних апаратів. Конкретизуючи цю мету, підводні операції можуть включати сканування дна, виявлення та дослідження об'єктів на дні моря, картографування та навігацію у складних умовах. Параметри ефективності, які можуть бути підвищені, включають точність та швидкість виконання завдань, зниження споживання

ресурсів (таких як час, енергія, обчислювальні потужності), збільшення глибини обстеження та здатність пристосовуватися до змінних умов довкілля під водою.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** На сьогоднішній день для мобільних роботів використовуються ієрархічні, поведінкові та гібридні архітектури математичного забезпечення для систем управління. Для більш докладного аналізу цих архітектур висуваються певні вимоги до інформаційно-управлінських систем (ІУС) АПА: зменшення використання обчислювальних ресурсів, вирішення конфліктів між різними цілями, використання інформації з різних датчиків, надійність, можливість поетапного розширення функціональності, простота у використанні та широкий спектр реалізації [12].

Ієрархічна архітектура будується на основі знань і має у своєму складі точне представлення оточуючого середовища у символічній формі. Рішення приймаються на основі формальних міркувань, що є однією з переваг цієї архітектури. Однак вона спрямована на використання роботів у структурованих і спостережуваних середовищах. Її застосування в багатоцільових автономних наземних платформах ускладнюється через високі вимоги до обчислювальної потужності та обмежену гнучкість [13].

У поведінковій архітектурі процес управління розбивається на основі бажаних зовнішніх проявів дій робота. Поведінка робота формується з операцій, виконуваних незалежними елементами (поведінками або агентами). Кожна поведінка спрямована на досягнення конкретної цілі, а її реакція базується на поточних даних з датчиків. Вплив на виконавчі пристрої робота обмежується певною підмножиною. Переваги поведінкової архітектури складаються у простоті реалізації, гнучкості (можливість етапного розширення) та низьких вимогах до обчислювальних ресурсів, що є важливим для багатоцільових автономних наземних платформ. Однак недоліки мають значний вплив суб'єктивних факторів при розподілі пріоритетів, функцій та взаємодії між різними поведінками [2, 5].

Однією з головних складнощів у поведінковому підході є забезпечення співпраці між групою активних поведінок. Існує декілька методів координації, серед яких можна виділити абсорбцію, вибір дії на основі оцінки активності кожної з поведінок, голосування та сумування. Кожен з цих методів найбільше підходить для певного класу завдань, проте загалом конкурентні методи з абсорбцією забезпечують більшу стійкість.

Гібридні архітектури по-різному поєднують у собі характеристики вищезгаданих архітектур. Наприклад, архітектура цілеспрямованої поведінки не зосереджується на складі та взаємодії модулів, а розглядає три рівні ієрархії з фіксованим розподілом функцій між ними (стратегічний, тактичний та виконавчий).

При розробці архітектури для АПА повинні обов'язково враховуватися вимоги до мінімізації використання ресурсів, гнучкості та можливості послідовного розширення. Отже, базовою для розробки архітектури авторами була прийнята трьохрівнева модель з розподілом функцій, що характерна для архітектури цілеспрямованої поведінки. Однак варто відзначити, що використання поведінкових керуючих структур (багаторівневих структур з абсорбцією) на виконавчому та тактичному рівнях є ключовою особливістю запропонованої архітектури. Такий підхід дозволив авторам виокремити явні завдання для АПА на верхньому рівні й одночасно забезпечити вимоги до ресурсів і можливості поетапного розширення [7, 14]. Для специфікації тактичного рівня поведінки використовується термін агенти. Загальна структура розробленого програмного забезпечення системи управління АПА показана на рис. 1.

Система складається з трьох рівнів: виконавчого, тактичного та стратегічного.

Виконавчий рівень відповідає за управління рухом робота та виконання рефлексорних функцій. У своєму складі він має повний комплект компонентів інформаційно-вимірювальної та управляючої систем. Дизайн цього рівня дозволяє виконувати всі функції, що залежать від апаратного забезпечення конкретного робота та надає апаратно-незалежний інтерфейс для взаємодії з тактичним рівнем.

Тактичний рівень використовується для організації виконання наступного завдання, поставленого стратегічним рівнем. Він безпосередньо керує режимами та цілями

виконавчого рівня. Для цього на цьому рівні розміщується набір агентів та арбітр, який утримує управлінську структуру агентів для вирішення поточного завдання.

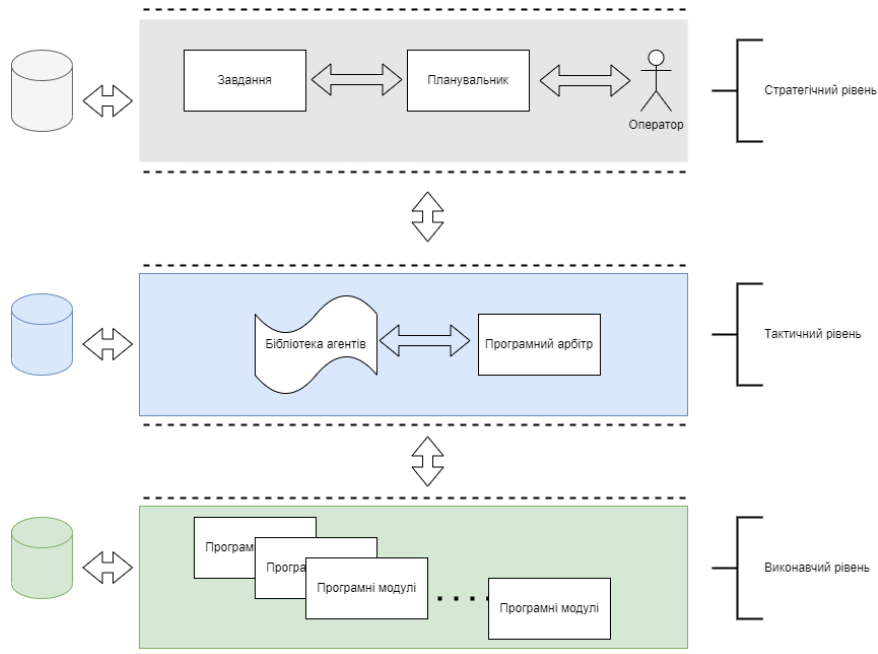


Рисунок 1 – Гібридна трирівнева архітектура програмного забезпечення АПА

Стратегічний рівень ієрархії представлений програмою-завданням, що містить опис цілей поточного завдання АПА. Для систематизації досягнення цілей у загальному випадку використовується планувальник.

Взаємодія між компонентами системи відбувається на базі моделі клієнт-сервер або з використанням абстрактних інтерфейсів, що реалізовані на основі розробленої програмної платформи, яка підтримує механізми подій та публікацій [15].

Розглянемо більш детально розроблені в цьому дослідженні принципи організації та алгоритми функціонування тактичного та виконавчого рівнів інформаційно-управляючої системи АПА (рис. 2).

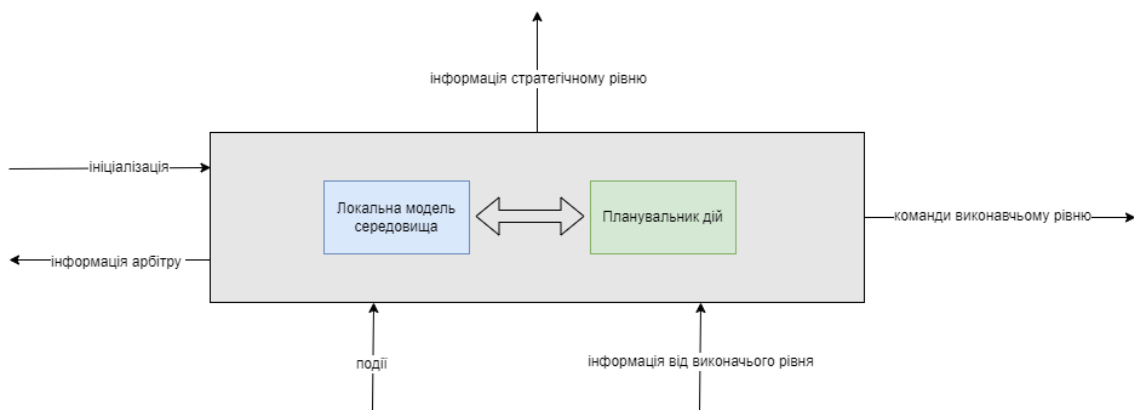


Рисунок 2 – Агентська структура тактичного рівня

Тактичний рівень системи складається з набору агентів, кожен з яких відповідає за вирішення конкретного аспекту завдання. Вхідними параметрами агента є опис завдання, що надійшов зі стратегічного рівня, а також необхідні дані з виконавчого рівня. Вихідним параметром є потік імперативних команд для виконавчого рівня. Агент має внутрішню структуру, яка складається з локальної моделі середовища, засобів планування дій на основі цієї моделі та аналізу вхідної та вихідної інформації для визначення працездатності агента.

Колекція агентів формується так, щоб будь-яке завдання цільового класу могло бути вирішено за допомогою комбінації та спільної роботи кількох елементів з колекції. Однією з

ключових проблем є вибір агента, необхідного для виконання поточного фрагменту завдання в даний момент. У класичному підході це завдання розв'язується на стратегічному рівні системи управління, що потребує наявності продукційної машини та значних обчислювальних потужностей. У запропонованому підході стратегічний рівень формує наступне завдання у вигляді списку агентів, необхідних для його вирішення. Список агентів передається на тактичний рівень разом з умовами їх активації. Таким чином, завдання тактичного рівня зводиться до створення, забезпечення функціонування та припинення дії зазначеної групи агентів.

Агент може перебувати в одному з кількох станів:

1. Активний: агент підтримує модель зовнішнього середовища в актуальному стані та формує списки команд для виконавчого рівня.

2. Пасивний: агент підтримує модель зовнішнього середовища в актуальному стані, але управління не формується.

3. Стан "помилка": агент повідомляє стратегічний рівень про неможливість виконувати свої функції. Цей стан виникає при помилкових вхідних даних або при виході з ладу керованих агентом виконавчих пристроїв.

Арбітр забезпечує непротиційне виконання агентів. Для цього він на основі поставленого завдання (тобто списку агентів) організовує зазначених агентів у багатопарову структуру управління (утворюючи шар 0). При цьому пріоритети кожного з агентів непрямо задаються на стратегічному рівні, виходячи з вкладеності завдань. До отриманої управляючої структури додається додатковий фіксований шар 1 з більш високим пріоритетом (рис. 3), що служить для організації реакції на події, не пов'язані з виконанням місії (обробка команд телеуправління). Таким чином, початковий план при виникненні незапланованих ситуацій може бути деталізований шляхом доробки його агентами зі шару 1.

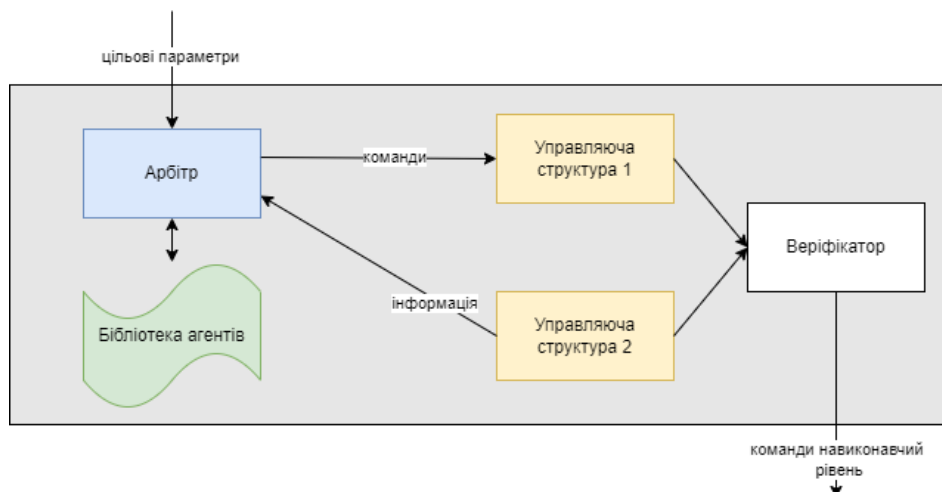


Рисунок 3 – Організація тактичного рівня

Тактичний рівень системи містить модель середовища, яка може змінюватися під час роботи шляхом збирання інформації від АПА. Це дозволяє ефективніше коригувати цільові точки під час переміщення.

Для завдання обстеження штучних протяжних об'єктів (ШПО) розроблено набір агентів, які забезпечують виконання повного циклу обстежувальних робіт. Ці агенти містять:

1. Типові покриття акваторії мережею курсів.
2. Виявлення та відстеження ШПО за допомогою різноманітних систем виявлення АПА.
3. Повторне обстеження попередньо перевірених об'єктів.
4. Обстеження виявлених під час обстеження чужих об'єктів.
5. Повернення до базування.

Показником присутності ШПО на основі даних  $n$ -ої системи виявлення АПА в часовий момент  $t$  є значення  $p_t^n$ , яке накопичує оцінки ймовірності існування контактів, що передують поточному часовому моменту:

$$p_t^{\Sigma n} = k^n p_{t-1}^{\Sigma n} + p_t^n, \quad (1)$$

де  $p_t^{\Sigma n}$  – сумарне значення контактів до певного моменту часу  $t$  для підсистеми  $n$ ;  
 $k^n$  – коефіцієнт загасання для підсистеми  $n$ .

Багаторівнева структура тактичного рівня використовується для організації обстеження ШПО. Структура містить 3 рівні управління (рис. 4):

1. Реалізація шуканої траєкторії.
2. Обстеження ШПО.
3. Обстеження чужих об'єктів, що знаходяться близько до ШПО.

Рівні послідовно активуються (і пригнічують нижчі) по мірі виявлення ШПО та чужих об'єктів у його навколишній області.

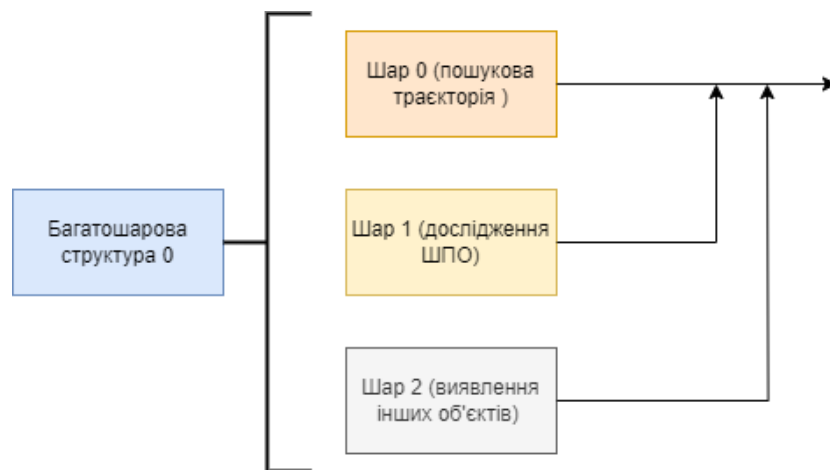


Рисунок 4 – Багаторівнева структура, що використовується для інспекції ШПО

Виконавчий рівень системи управління реалізується як реактивний інтерпретатор потоку команд від тактичного рівня. Він взаємодіє з тактичним рівнем за допомогою інтерфейсу, який містить повідомлення та команди різних типів (управління рухом та бортовою апаратурою, видача вимірних параметрів та обробка подій).

Організація цілеспрямованого руху недалеко від дна є одним з основних завдань виконавчого рівня. Такий рух організовується як комбінація двох елементарних поведінок: досягнення цільової точки та ухилення від перешкод [15, 16].

Виконавчий рівень також реалізує поведінки АПА, пов'язані із забезпеченням безпеки. Такі поведінки надаються системою контролю та аварійного реагування АПА, яка контролює стан бортових пристроїв, параметри руху АПА та точність виконання команд місії. Для ідентифікації аварійних ситуацій відстежуються розходження між моделлю відповідного процесу та його реалізацією. Ситуація вважається аварійною, якщо це розходження перевищує задані межі протягом встановленого інтервалу часу. У такому випадку використовується фіксована реакція системи типу "якщо-то".

Згідно з прийнятою методологією, на виконавчому рівні завдання, що керують однаковими виконавчими пристроями, об'єднуються в багаторівневу керуючу структуру з перевагою (домінуванням), наведену на рис. 5:

- стандартного руху;
- корекції руху (вибір одного з двох варіантів визначається цілями, встановленими тактичним рівнем);
- рефлекторних дій системи контролю та аварійного реагування.

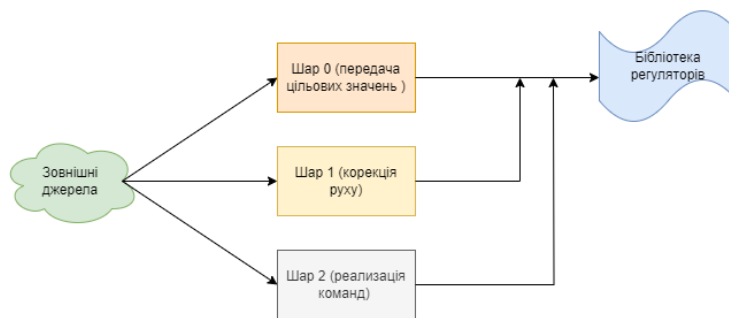


Рисунок 5 – Багаторівневі структури поведінки виконавчого рівня

Поведінкові особливості, втілені на виконавчому рівні та агентах тактичного рівня, у даній статті не розглядаються, що обумовлене бажанням систематично зосередитися на концептуальній побудові бібліотеки агентів тактичного рівня. Обрана стратегія дозволила глибше проаналізувати та обґрунтувати процес функціональної декомпозиції цільового класу завдань обстеження морських глибин та підводних операцій, що є ключовим етапом роботи.

Практична реалізація задекларованої мети містить такі етапи (рис. 6):

1. У першу чергу може бути розпочато процес розробки бібліотеки агентів, використовуючи концепції функціональної декомпозиції цільового класу завдань. Це може включати створення архітектури програми, алгоритмів, методів інтеграції та тестування.

2. Після розробки бібліотеки агентів, вона потребуватиме тестування на різних сценаріях та завданнях, пов'язаних із обстеженням морських глибин та підводними операціями. Це включає перевірку роботи окремих агентів, їхню взаємодію та відповідність задекларованим функціям та вимогам.

3. Після тестування може виникнути необхідність в оптимізації або вдосконаленні роботи бібліотеки. Це може включати удосконалення алгоритмів, збільшення швидкості роботи, підвищення точності чи збільшення функціональності агентів.

4. Так як метою є застосування цієї бібліотеки в реальних умовах, то в подальшому планується впроваджувати її в системи підводних апаратів для тестування в реальних умовах. Це дозволить оцінити ефективність та придатність бібліотеки на практиці.

5. Після успішного завершення розробки, тестування та оптимізації, важливо документувати всі кроки та результати. Це може включати написання технічних звітів, статей або публікацію в наукових журналах для спільного використання зі спільнотою дослідників та фахівців у цій області.



Рисунок 6 – Структура процесу практичної реалізації задекларованої мети



Такий цикл розробки та впровадження може допомогти реалізувати заявлену мету та допомогти у покращенні ефективності вирішення завдань обстеження морських глибин та виконанні підводних операцій за рахунок використання перспективного математичного забезпечення автономних підводних апаратів.

Таким чином, стаття привносить значну наукову новизну шляхом побудови методологічного підходу до розробки та функціональної декомпозиції цільового класу завдань, який унікальним чином визначає складові елементи та взаємозв'язки між ними. Особливу цінність представляє можливість створення бібліотеки агентів тактичного рівня для вирішення завдань обстеження морських глибин та підводних операцій, що може відображати новаторський підхід до цієї проблеми та потенційно стати основою для подальших досліджень у цій сфері.

**Висновки.** Для розробки системи управління автономним підводним апаратом запропоновано нову архітектуру, яка використовує як ієрархічні, так і поведінкові управлінські структури. Це значно розширює можливості АПА, дозволяючи йому вирішувати завдання різних класів в умовах обмежених обчислювальних ресурсів бортової обчислювальної мережі.

У рамках запропонованої архітектури запропоновано використання поведінкового підходу на різних рівнях функціональної трьохрівневої архітектури системи управління. При цьому управлінські структури виконавчого рівня мають постійний склад, а на тактичному рівні формуються змінні структури, які створюються на основі розробленої бібліотеки агентів. Це забезпечує легке нарощування функціональності по мірі появи нових завдань та апаратних засобів.

Обґрунтовано підхід щодо побудови бібліотеки агентів тактичного рівня на основі функціональної декомпозиції цільового класу завдань. Дії робота формуються в термінах агентів, що утворюють бібліотеку, що забезпечує основу для створення декларативних місій. Розроблена та досліджена структура агента, яка включає локальну модель середовища, засоби планування дій на базі цієї моделі та аналізу використовуваної інформації для визначення працездатності агента.

Таким чином, у статті пропонується досягнути підвищення ефективності обстеження морських глибин завдяки розробці нової архітектури системи управління підводним апаратом та використанню бібліотеки агентів тактичного рівня. Це в подальшому дозволить підвищити точність, швидкість та адаптивність процесу обстеження, забезпечивши апарату можливість ефективно реагувати на різноманітні умови підводного середовища. Разом з тим, важливо підкреслити, що стаття, як концептуального характеру, не призводить числові показники ефективності, але направлена на підвищення ефективності обстеження морських глибин та підводних операцій завдяки використанню нової архітектури та бібліотеки агентів тактичного рівня.

**Перспективи подальших досліджень.** Проведені дослідження показали необхідність удосконалення системи управління автономними підводними апаратами при поглибленні вирішення більш складних завдань, а не тільки пошуку та обстеження.

Гостро постає питання щодо розширення класів вирішуваних завдань. Так, у ході подальших наукових досліджень автор готовий сфокусувати зусилля на розпізнаванні та класифікації об'єктів пошуку та ситуацій, що складаються у підводному середовищі, виявленні тенденцій розвитку обстановки, моделюванні поведінки певних об'єктів, які можуть складати небезпеку або загрозу.

Планується продовжити роботу щодо розширення переліку даних, що можуть бути задіяні для вирішення вище висвітлених завдань. Окремим питанням є удосконалення гнучкості системи управління автономними підводними апаратами за рахунок впровадження нових поведінкових алгоритмів, у тому числі з використанням інтелектуальних агентів. У рамках розробленої архітектури на тактичному рівні передбачається значне розширення запропонованої бібліотеки агентів, що значно підвищить нарощування функціональних

можливостей системи при виникненні нових завдань та удосконаленні апаратних засобів системи управління.

Крім того, слід зазначити у найближчій перспективі планується впровадити застосування окремих елементів штучного інтелекту при виконанні завдань планування місій і організації взаємодії апаратів з динамічно змінюваним оточуючим середовищем у підводному просторі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Murphy R. R. Introduction to AI Robotics. Cambridge, MA : MITpress; 2019, 648 p.
2. Cashmore M., Fox M., Long D., Magazzeni D., Ridder B., Carrera A., Palomeras N., Hurtos N., Carreras M. Rosplan : Planning in the robot operating system. In : Proceedings of the international conference on automated planning and scheduling. 2015. vol 25, pp 333–341.
3. Kirchner F., Straube S., Kühn D., Hoyer N. AI technology for underwater robots. Springer, Cham, CH; 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30683-0>.
4. Christensen L., de Gea Fernández J., Hildebrandt M. et al. Recent Advances in AI for Navigation and Control of Underwater Robots. Curr Robot Rep 3, 2022. p. 165–175.
5. Zhandong Li, Jianguo Tao, Hao Sun, Yang Luo, Liang Ding, Zongquan Deng Hydrodynamic calculation and analysis of a complex-shaped underwater robot based on computational fluid dynamic sand prototype test Advances in Mechanical Engineering 2017, Vol. 9(11), pp. 1–10.
6. Zhimin Liu, Xiaozhong Zhou. Hydrodynamic Analysis and Structural Optimization of an Underwater Robot October 2019 IOP Conference Series Materials Science and Engineering 649(1):012017 DOI: 10.1088/1757-899X/649/1/012017.
7. Thompson F., Guihen D. Review of mission planning for autonomous marine vehicle fleets. Journal of Field Robotics.2019;36(2):33–54. <https://doi.org/10.1002/rob.21819/>.
8. Panda M., Das B., Subudhi B., Pati BB. A comprehensive review of path planning algorithms for autonomous underwater vehicles. Int J Autom Comput. 2020; 17(3). p. 321–352.
9. D. L. Li, P. Wang, L. Du. Path planning technologies for autonomous underwater vehicles-a review. IEEE Access, vol. 7, pp. 9745–9768, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2888617.
10. Ali Jebelli, Mustapha C. E. Yagoub, R.H.J. Abdul Rahim, H. Kazemi Design and construction of an underwater robot based fuzzy logic controller January 2013 International Review of Mechanical Engineering (IREME) 7(1): 147–153.
11. Ali Jebelli, M.C.E. Yagoub, B. S. Dhillon Design and Control of Underwater Robots with Rotating Thrusters International Journal of Robotics and Automation (IJRA) Vol. 5, No. 4, December 2016, pp. 284–294.
12. Moniruzzaman M., Islam SMS, Bennamoun M., Lavery P. Deep learning on underwater marine object detection : a survey. In: International conference on advanced concepts for intelligent vision systems. Springer; 2017. pp 150–160.
13. Roehr TM, Kirchner F. Spatiotemporal planning for a reconfigurable multi-robot system. In: Finzi A., Karpas E., editors. Proceedings of the 4th workshop on planning and robotics (PlanRob). London; 2016. pp. 135–146.
14. Yuan J., Wang H., Zhang H., Lin C., Yu D., Li C. AUV obstacle avoidance planning based on deep reinforcement learning. Journal of Marine Science and Engineering. 2021; 9(11):1166. <https://doi.org/10.3390/jmse9111166>.
15. Guo T., Jiang N., Li B.Y. UAV navigation in high dynamic environments : A deep reinforcement learning approach. Chin. J. Aeronaut. 2021, 34, 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.05.011>.
16. Antonelli G. Underwater robots. Springer Tracts in Advanced Robotics, vol 123. Springer International Publishing, Cham; 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77899-0>.

## REFERENCES

1. Murphy, R. R. (2019). Introduction to AI Robotics. Cambridge, MA: MITpress; 648 p.
2. Cashmore, M., Fox, M., Long, D., Magazzeni, D., Ridder, B., Carrera, A., Palomeras, N., Hurtos, N., Carreras, M. (2015). Rosplan: Planning in the robot operating system. In: Proceedings of the international conference on automated planning and scheduling. vol 25, pp 333–341.
3. Kirchner, F., Straube, S., Kühn, D., Hoyer, N. (2020). AI technology for underwater robots. Springer, Cham, CH; <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30683-0>.
4. Christensen, L., de Gea Fernández, J., Hildebrandt, M. et al. (2022). Recent Advances in AI for Navigation and Control of Underwater Robots. *Curr Robot Rep* 3, p. 165–175.
5. Zhandong Li, Jianguo Tao, Hao Sun, Yang Luo, Liang Ding, Zongquan Deng (2017). Hydrodynamic calculation and analysis of a complex-shaped underwater robot based on computational fluid dynamic sand prototype test *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9(11), pp. 1–10.
6. Zhimin Liu, Xiaozhong Zhou (2019). Hydrodynamic Analysis and Structural Optimization of an Underwater Robot October 2019 IOP Conference Series Materials Science and Engineering 649(1):012017 DOI: 10.1088/1757-899X/649/1/012017.
7. Thompson, F., Guihen, D. (2019). Review of mission planning for autonomous marine vehicle fleets. *Journal of Field Robotics*. 36(2): 33–54. <https://doi.org/10.1002/rob.21819/>.
8. Panda, M., Das, B., Subudhi, B., Pati, BB. (2020). A comprehensive review of path planning algorithms for autonomous underwater vehicles. *Int J Autom Comput*. 17(3). p. 321–352.
9. Li, D. L., Wang, P., Du, L. (2019). Path planning technologies for autonomous underwater vehicles—a review. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 9745–9768. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2888617.
10. Ali Jebelli, Mustapha, C. E. Yagoub, R.H.J. Abdul Rahim, H. (2013). Kazemi Design and construction of an underwater robot based fuzzy logic controller January 2013 *International Review of Mechanical Engineering (IREME)* 7(1):147–153.
11. Ali Jebelli, M.C.E. Yagoub, B. S. (2016). Dhillon Design and Control of Underwater Robots with Rotating Thrusters *international Journal of Robotics and Automation (IJRA)* Vol. 5, No. 4, December, pp. 284–294.
12. Moniruzzaman, M., Islam SMS, Bennamoun, M., Lavery P. (2017). Deep learning on underwater marine object detection: a survey. In: *International conference on advanced concepts for intelligent vision systems*. Springer; pp 150–160.
13. Roehr TM, Kirchner, F. (2016). Spatiotemporal planning for a reconfigurable multi-robot system. In: Finzi A, Karpas E, editors. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> workshop on planning and robotics (PlanRob)*. London; pp. 135–146.
14. Yuan, J., Wang, H., Zhang, H., Lin, C., Yu, D., Li, C. (2021). AUV obstacle avoidance planning based on deep reinforcement learning. *Journal of Marine Science and Engineering*. 9(11): 1166. <https://doi.org/10.3390/jmse9111166>.
15. Guo, T., Jiang, N., Li, B. Y. (2021). UAV navigation in high dynamic environments: A deep reinforcement learning approach. *Chin. J. Aeronaut*. 34, 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.05.011>.
16. Antonelli, G. (2018). Underwater robots. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol. 123. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77899-0>.

**Kalinichenko Ye. V., Zaiets A. Yu.** DEVELOPMENT OF BASIC APPROACHES TO ORGANIZING SOFTWARE FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES FOR SOLVING SURVEY TASKS

*The aim of the article is to enhance the efficiency of surveying the ocean depths and performing various underwater operations by utilizing advanced mathematical frameworks in autonomous underwater vehicles. The article discusses the challenges in developing a control system for autonomous underwater vehicles, noting that existing control systems are primarily designed for search-based tasks, while these vehicles can be used for more complex operations such as surveying. To successfully address these tasks, autonomous underwater vehicles require a flexible control system capable of adapting to new tasks and data from onboard sensors. The article proposes a new architecture for the mathematical framework of the control system,*

*integrating both hierarchical and behavioral control structures. This significantly expands the capabilities of these vehicles, enabling them to tackle diverse tasks within the constraints of computational resources onboard. Within this proposed architecture, a behavioral approach is employed across different functional hierarchical levels of the control system. Notably, executive-level control structures maintain a constant composition, while variable structures are formed at the tactical level based on a developed library of agents, allowing for easy functionality expansion as new tasks and hardware emerge. The article justifies an approach for constructing a library of tactical-level agents based on the functional decomposition of the target task class. The actions of the agents forming the library are established, providing the groundwork for creating declarative missions. Furthermore, a researched agent structure containing a local environmental model, action planning tools based on this model, and an analysis of utilized information to determine agent operability is developed and investigated. This developed control system structure could be further proposed for testing on autonomous underwater vehicles.*

**Key words:** autonomous underwater vehicles; behavioural architecture; hierarchical architecture; hybrid architecture; coordination; conflicts; reliability; agents.

© Калініченко Є. В., Заєць А. Ю.

Статтю прийнято  
до редакції 20.10.2023