

СУЧАСНІ ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ ПІДВОДНИМИ АПАРАТАМИ

В. С. Блінцов, д-р техн. наук;¹
С. В. Блінцов, канд. техн. наук;¹
Р. В. Вакар, наук. співроб.²

¹Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

²Науково-дослідний центр Збройних сил України «Державний океанаріум», м. Севастополь

Анотація. Показано перспективність застосування штучних нейромережних систем для систем автоматизації підводних апаратів. Наведено узагальнену структуру системи автоматичного керування рухом підводного апарата. Подано перелік основних задач синтезу такої системи.

Ключові слова: автономний підводний апарат, система автоматичного керування, штучна нейронна мережа.

Аннотация. Показана перспективность применения искусственных нейронных систем для систем автоматизации подводных аппаратов. Приведена обобщенная структура системы автоматического управления движением подводного аппарата. Представлен перечень основных задач синтеза такой системы.

Ключевые слова: автономный подводный аппарат, система автоматического управления, искусственная нейронная сеть.

Abstract. The availability of artificial neural networks application for automatic systems of underwater vehicles is presented. The generalized structure of the automatic control system of underwater vehicle motion is given. The list of main tasks of such system's synthesis is given.

Keywords: autonomous underwater vehicle, automatic control system, artificial neural network.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Аналіз технічних засобів для дослідження підводного простору свідчить, що на цей час одним з ефективних інструментів для виконання пошукових, інспекційних та дослідницьких робіт є ненаселені автономні підводні апарати (АПА) [1, 21–23]. Такі апарати позбавлені багатьох недоліків телекерованих та населених підводних апаратів і дають змогу ефективно розв'язувати задачі, пов'язані з проведенням тривалих підводно-пошукових робіт. Проте через відсутність людини-оператора і ліній оперативного зв'язку з постом керування, ефективне застосування

АПА вимагає наявності на його борту розвиненої системи автоматичного керування (САК).

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Задачі синтезу САК для АПА досить широко висвітлюються у вітчизняній та зарубіжній науково-технічній літературі. Їх аналіз дає змогу встановити наступні головні напрямки розробки і вдосконалення САК:

підвищення точності траєкторного руху АПА шляхом розробки адаптивних регуляторів [15, 19, 20];

застосування інерційних навігаційних систем [2, 6];

синтез нових типів регуляторів на основі застосування елементів штучного інтелекту [8, 12].

Останній напрямок є найбільш перспективним, оскільки дає змогу будувати САК для роботи в умовах невизначеності. Характерними для вказаних робіт є високий рівень теоретичного узагальнення та відсутність даних про проектні рішення і конкретні інженерні рекомендації щодо практичного створення сучасних САК для конкретних типів АПА за призначенням.

МЕТОЮ РОБОТИ є аналіз сучасного стану інженерних розробок у напрямку САК автономними підводними апаратами та формулювання науково обґрунтованих рекомендацій щодо їх побудови для пошукових АПА.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Аналіз принципів побудови САК пошуковими АПА дає змогу встановити, що вони пройшли тривалий шлях розвитку.

Першими системами керування підводними апаратами були системи стабілізації параметрів просторового руху. Їх створення пов'язане з появою у 80-х роках

XX сторіччя нової елементної бази електроніки — інтегральних мікросхем. Викликане їх упровадженням зменшення розмірів блоків електронного обладнання АПА дало можливість створювати САК, що забезпечують стабілізацію руху по заданому маршруту. Побудовані в СРСР перші АПА з такими САК («Скат-Гео», «Л-2», «Тифлонус») успішно виконували відносно простої завдання з обстеження великих площ донної поверхні або збору даних у різних горизонтах океану [1]. Основою структури САК був головний керуючий модуль, а також набір необхідних сенсорів і виконавчих пристроїв. Обмін інформацією відбувався в аналого-цифровому вигляді за допомогою лінійної програми, закладеної в керуючому модулі САК.

Подальшим етапом розвитку САК АПА стала поява мікропроцесорів і мікро-

контролерів на їх основі. Це дозволило докорінно змінити архітектуру САК АПА, розширити її функціональні можливості і підвищити надійність. Мініатюризація елементної бази дала змогу винести функції первинної обробки і підготовки інформації від сенсорів в окремі модулі збору даних. Частина функцій, пов'язаних з роботою виконавчих механізмів (таких, як рушії АПА), також була винесена до складу окремих блоків. Таким чином, підтримку заданої частоти обертання та контроль стану рушіїв здійснював окремий модуль, оснащений власним мікроконтролером.

Це сприяло тому, що САК АПА набула рис локальної обчислювальної системи з відповідною їй топологією передачі даних. Усередині цієї системи відбувається обмін цифровими даними як між головним обчислювальним модулем і складовими частинами системи, так і між модулями керування і збору даних. Залежно від цього САК може мати як комбіновану, так і чітко виражену конфігурацію «зірка» або «шина». Дана архітектура є найбільш поширеною на цей час. У світі налічується велика кількість успішно працюючих АПА, які обладнані САК, побудованою на вказаній основі. У створених апаратах розробниками реалізовано ефективні алгоритми обходу перешкод, можливість задання складних траєкторій руху, режими тестування і самоперевірки [19]. Проте дані можливості реалізовані за допомогою лінійних алгоритмів, а перелік нештатних ситуацій та алгоритми реакції на них задаються програмістом. Виходячи з цього, на цей час існують два основні варіанти побудови САК АПА.

Перший варіант передбачає введення каналу зв'язку «АПА – оператор». Як середовище передачі даних можуть використовуватися дротяні або оптоволоконні лінії зв'язку, що мають широку смугу пропускання. Такі принципи використовує італійський протимінний апарат «Pluto» [6]. Як переваги даного шляху варто відзначити можливість керування й отримання даних з АПА в реальному часі, можливість безпосереднього корегування завдання АПА та оперативного керування ним. Проте в даному випадку

АПА втрачає частину своєї «автономності», наближаючись за принципами свого використання до прив'язаних систем.

Другий варіант побудови САК АПА передбачає використання гідроакустичного каналу передачі даних. Швидкість сучасних гідроакустичних модемів може досягати 128 кБ/с, що дає можливість не тільки корегування дій АПА, але й передачі в реальному часі телеметричної інформації і малокадрового відео. При цьому стає важливим не тільки дослідження можливостей збільшення пропускної здатності каналу передачі даних, але й розробка досконаліших алгоритмів стискування різномірних типів даних.

Існують також способи обміну даними за допомогою радіоканалу. Дане технічне рішення найбільш виправдане в напівзакритих АПА і використовується у створеному для ВМС США апараті AN\WLD-1. Радіоканал може бути також використаний і глибоководними апаратами, проте це вимагає їх періодичного спливання для передачі зібраної інформації і корекції програми місії (АПА ВМС США AN\BLQ-11) [6].

Аналіз науково-технічної літератури та власний досвід авторів свідчать, що незалежно від обраного варіанта побудови САК магістральним напрямком удосконалення керування АПА є застосування елементів штучного інтелекту — нечітких регуляторів (НР), регуляторів на основі штучних нейронних мереж (ШНМ) та систем автоматичного керування на їх основі. Це дає змогу створювати повністю автономні АПА, здатні самостійно виконувати складні завдання площинного обстеження, пошуку і класифікації об'єктів без участі оператора в умовах невизначеності параметрів зовнішнього середовища та нестационарності власних параметрів АПА [8, 12]. Викорис-

тання ШНМ-регуляторів дає змогу будувати керуючі модулі верхнього рівня, а нечітких регуляторів — виконавчі модулі АПА.

Зазначимо, що застосування НР виявилось ефективним у широкому спектрі робототехнічних систем, де параметри об'єктів керування не визначені або змінюються в широких межах. Прикладами успішного застосування НР є керування системою «стернова машина – ракета» та нечіткі регулятори слідкуючих координаторів, керування мобільним роботом та керування стабілізованим рухом маломірного судна на курсі і траєкторії [7, 9, 10].

Початком розробки й застосування ШНМ-регуляторів у системах автоматичної обробки інформації вважають роботи У. Мак-Каллока та У. Піттса (1943 р.), у яких мозок людини представляється як «комп'ютер», «нейронами» якого є логічні елементи, що реагують на порогові значення [13]. В Україні провідну роль у розвитку ШНМ-регуляторів відіграли роботи академіка НАН України М. М. Амосова та його колег [4]. Головною властивістю ШНМ є здатність до самонавчання, що дає змогу автоматизувати процеси для об'єктів, у яких відсутні або існують у неповному обсязі моделі функціонування [11, 17].

Для керування рухомими об'єктами (промисловими роботами, транспортними засобами тощо) ШНМ застосовують як апроксиматори нелінійних характеристик об'єктів керування, як емулятори прямих та інверсних моделей цих об'єктів і як власне регулятори — генератори керуючих впливів. Типовим прикладом застосування ШНМ у системах керування АПА є схема, показана на рис. 1 [14].

Регулятор на основі ШНМ (ШНМ-Р) реалізує функції самонавчання та автоматичного керування рухом АПА по одній ко-

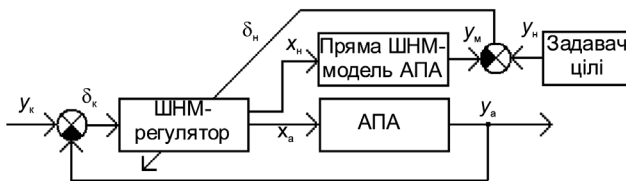


Рис. 1. Схема ШНМ-регулятора руху АПА по одній координаті

ординаті і працює у двох режимах: навчання і керування. У режимі навчання задавач цілі генерує навчальну послідовність заданих значень керованої координати y_n . Керуючий сигнал x_n з регулятора руху апарата ШНМ-Р подається на пряму ШНМ-модель АПА, яка є апроксиматором функції «вхід-вихід» $y_a = f(x_a)$ об'єкта керування. Вихід прямої моделі ум порівнюється з заданим значенням координати y_n , а похибка керування $\delta_n = (y_n - y_m)$ використовується для навчання ШНМ-Р. На фазі керування контур навчання відключається, і регулятор працює як регулятор по відхиленню від заданого значення реальної керованої величини y_k .

Практична реалізація елементів штучно-го інтелекту в САК АПА знаходиться на початковій стадії розвитку, але теоретичні дослідження і практичні результати ШНМ-Р, отримані в інших напрямках робототехніки, свідчать про перспективність їх застосування в САК АПА [3, 5].

У зв'язку з викладеним вище розглянемо перспективи застосування та особливості побудови ШНМ-Р для створення САК пошуковими АПА. До головних видів режимів функціонування пошукових АПА, які реалізуються бортовими САК, належать:

квазілінійний рух зі стабілізацією параметрів руху (глибини, висоти над ґрунтом, швидкості, курсу та траєкторії) з метою обстеження заданих ділянок морського дна (чи водного простору) пошуковими галсами;

просторовий рух по обчисленій в САК траєкторії при зміні галсів та обминанні навігаційних перешкод;

вихід у задану точку морського дна (чи водного простору) за даними гідролокатора та/чи бортового навігаційного комплексу;

позиціонування в заданій точці морського дна (чи водного простору) за допомогою гідролокатора та/чи бортового навігаційного комплексу.

Сформульовані режими функціонування визначають необхідність синтезу трьох основних типів САК АПА на базі ШНМ-Р (далі — ШНМ-САК):

ШНМ-САК квазілінійним горизонтальним (маршовим) рухом АПА;

ШНМ-САК траєкторним та маневреним рухом АПА;

ШНМ-САК позиціонуванням АПА в заданій точці підводного простору.

Аналіз свідчить, що зазначені типи САК відрізняються між собою властивостями прямих ШНМ-моделей, які утворюють основу для навчання відповідного ШНМ-Р режиму функціонування АПА. При створенні таких моделей доцільно використовувати відомі рівняння гідромеханіки корпусу АПА [19]:

$$\frac{d\bar{K}}{dt} + \bar{\Omega} \cdot \bar{K} = \bar{R};$$

$$\frac{d\bar{L}}{dt} + \bar{\Omega} \cdot \bar{L} + \bar{V} \cdot \bar{K} = \bar{M}, \quad (1)$$

де \bar{K} — головний вектор кількості руху АПА; \bar{L} — головний вектор моменту кількості руху відносно початку координат; $\bar{R} = (\bar{F} + \bar{T})$ — головний вектор зовнішніх сил, що діють на АПА; \bar{F} — вектор рівнодіючої зовнішніх сил гідродинамічної природи, які діють на корпус АПА; \bar{T} — вектор упорів рушійного комплексу АПА; \bar{M} — головний вектор моменту зовнішніх сил відносно початку координат; $\bar{V} = \{V_x, V_y, V_z\}$ — вектор лінійної швидкості АПА; V_x, V_y, V_z — проєкції вектора \bar{V} на відповідні осі зв'язаної системи координат; $\bar{\Omega} = \{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}$ — вектор кутової швидкості АПА; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — проєкції вектора $\bar{\Omega}$ на відповідні осі зв'язаної системи координат.

Пряма ШНМ-модель M_L квазілінійного горизонтального руху АПА може бути побудована на основі рівнянь (1), лінеаризованих в околі робочої точки з урахуванням нелінійних гідродинамічних процесів «у малому». При цьому процесами крену і диференту корпусу АПА нехтують.

Прямі ШНМ-моделі M_M маневреного руху АПА та руху по заданій траєкторії також можуть бути синтезовані на основі рівнянь (1), але вимагають урахування суттєво нелінійних явищ роботи корпусу АПА в косому потоці води та викликаного ними зниження упорів вертикальних рушіїв [18].

Пряма ШНМ-модель АПА M_p для режимів позиціонування в точці повинна врахову-

вати суттєві нелінійності обтікання корпусу та роботи рушіїв АПА в реверсних режимах [8].

Зазначимо, що синтез кожної з указаних моделей виконується шляхом «навчання» відповідних ШНМ, що є окремою наукомісткою операцією і не має достовірних та апробованих методик [16].

Узагальнена структурна схема САК рухом АПА, яка функціонує на базі мно-жини $M = \{M_L, M_M, M_P\}$ прямих ШНМ-моделей об'єкта керування, наведена на рис. 2.

Запропонована система передбачає, що рушійний комплекс АПА містить по одному рушію (гребному гвинту) по кожній з осей $\{x, y, z\}$, жорстко зв'язаних з корпусом АПА. Відповідно ШНМ-САК містить три регулятори ШНМ-Р для керування виконавчими механізмами (ВМ) АПА по осях $\{x, y, z\}$, три прямі математичні моделі виконавчих механізмів (ММВМ), кожна з яких включає в себе модель електропривода та гребного гвинта АПА по відповідній осі, а також пряму ШНМ-модель гідродинамічної взаємодії корпусу АПА з водним середовищем [8]. Об'єкт керування представлено трьома виконавчими механізмами «електропривод-гребний гвинт» та корпусом власне АПА.

Основними режимами ШНМ-САК є режим навчання і режим автоматичного керування, які реалізуються замиканням від-

повідних ключів S_H і S_K . У режимі навчання ключі S_H замкнено, а ключі S_K — розімкнено. При цьому на вхід САК подається заздалегідь сформована навчальна вибірка значень керованої величини Y_H для відповідного режиму функціонування пошукового АПА (стабілізації на курсі, траєкторії чи в точці підводного простору). Крім того, задаються також зовнішні впливи (збурення водного середовища F_H та інформація про можливі навігаційні перешкоди I_H). Сигнали з задавача навчальних вибірок надходять до обчислювача O_1 , який генерує набори керованих величин (параметрів руху по осях x, y, z зв'язаної системи координат) моделі АПА для обраного режиму роботи АПА. У залежності від режиму роботи це можуть бути поточні значення заданих просторових координат АПА $\{x_H(t), y_H(t), z_H(t)\}$, швидкостей просторового руху $\{V_{Hx}(t), V_{Hy}(t), V_{Hz}(t)\}$ тощо. На рис. 2 зображено варіант побудови ШНМ-САК для випадку, коли керованими величинами є просторові координати АПА.

Навчальні сигнали керування для виконавчих механізмів моделі АПА надходять до математичних моделей ВМ, вихідні сигнали яких (моделі упорів $T_M = \{T_{Mx}, T_{My}, T_{Mz}\}$) надходять до прямої ШНМ-моделі гідродинаміки корпусу АПА, вихідні сигнали якої на суматорах порівнюються з сигналами навчальних вибірок. Похибки керування

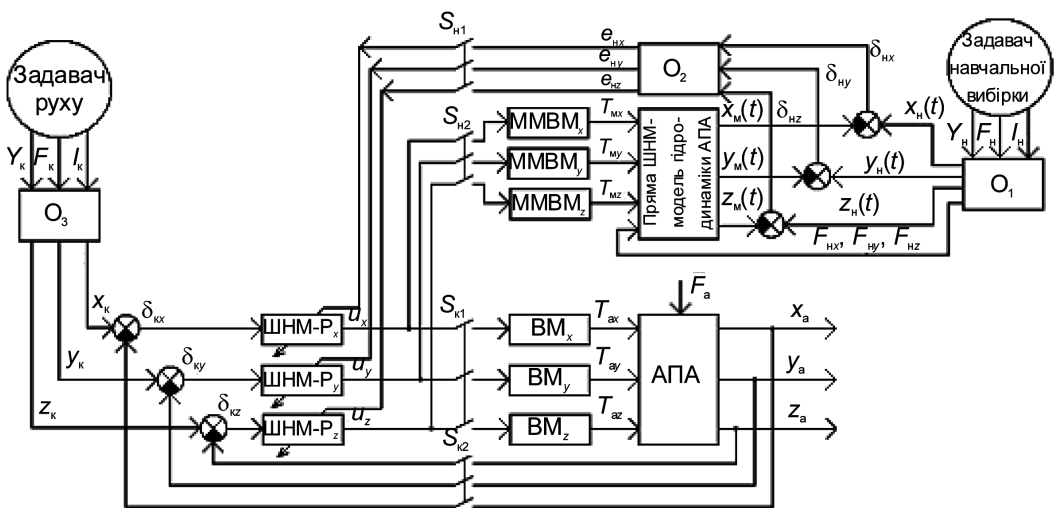


Рис. 2. Узагальнена схема ШНМ-САК рухом АПА

режиму навчання $\{\delta_{nx}, \delta_{ny}, \delta_{nz}\}$ надходять до обчислювача O_2 , де визначаються сигнали $\{e_{nx}, e_{ny}, e_{nz}\}$ настроювання ШНМ-Р для кожного з ВМ АПА.

У режимі автоматичного керування ключі S_k замкнено, а ключі S_n розімкнено. На вхід ШНМ-САК від задавача руху АПА надходять поточні значення заданої керованої величини Y_k , вимірювані характеристики збурень зовнішнього середовища F_k та інформація про реальні навігаційні перешкоди I_k . Обчислювач O_3 визначає керовані величини для ВМ АПА, які на суматорах порівнюються з фактичними значеннями просторових координат АПА. Похибки керування $\{\delta_{kx}, \delta_{ky}, \delta_{kz}\}$ подаються на ШНМ-регулятори ВМ АПА, де обчислюються сигнали керування $\{u_x, u_y, u_z\}$ відповідними ВМ.

З урахуванням викладеного вище сформулюємо основні задачі синтезу систем автоматичного керування АПА на основі ШНМ:

синтез ШНМ-моделі гідродинаміки АПА та математичної моделі його рушійного комплексу як виконавчого механізму, за допомогою якого забезпечується заданий просторовий рух АПА;

генерація вибірки значень керованої величини Y_n для навчання ШНМ-САК АПА, яка б урахувала наявність навігаційних перешкод та дію зовнішніх збурень на складові вектора рівнодіючої зовнішніх сил гідродинамічної природи, що діють на корпус АПА;

синтез обчислювача O_1 для визначення наборів керованих величин руху АПА у залежності від величин Y_n, F_n та I_n ;

синтез обчислювача O_2 для визначення сигналів настроювання ШНМ-Р для кожного з ВМ АПА;

синтез обчислювача O_3 для визначення керованих величин для ВМ АПА;

синтез ШНМ-регуляторів для керування ВМ АПА по відповідних осях у зв'язаній системі координат.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу сучасного стану та напрямків розвитку систем автоматичного керування просторовим рухом АПА встановлено доцільність та перспективність використання регуляторів його виконавчими механізмами із застосуванням штучних нейронних мереж.

2. Для побудови високоефективних САК плоским та просторовим рухом АПА актуальною є розробка достовірних математичних і синтез на їх основі прямих ШНМ-моделей гідродинаміки корпусу АПА та математичних моделей виконавчих механізмів підводного апарата як складових ШНМ-регулятора руху АПА.

3. Практична розробка систем автоматичного керування рухом АПА на основі штучних нейронних мереж повинна ґрунтуватись на ряді підготовчих заходів, які включають у себе генерацію навчальних вибірок та синтез спеціалізованих обчислювачів для визначення наборів керованих величин руху АПА, сигналів настроювання ШНМ-регуляторів та керованих величин для виконавчих механізмів АПА.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Агеев, М.Д. Автономные подводные роботы: системы и технологии [Текст] / М. Д. Агеев, Л. В. Киселев, Ю. В. Матвиенко [и др.]; под общ. ред. М. Д. Агеева. — М. : Наука, 2005. — 398 с.
- [2] Агеев, М.Д. Инерциальные датчики для навигации и ориентации АНПА [Текст] / М. Д. Агеев // Подводные исследования и робототехника. — 2007. — № 1(3). — С. 5–11.
- [3] Александров, В.Л. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях [Текст] / В. Л. Александров, А. П. Матлах, Ю. И. Нечаев, В. И. Поляков, [и др.]; под ред. Ю. И. Нечаева. — СПб. : Изд. центр СПбГМТУ, 2001. — 395 с.
- [4] Амосов, Н.М. Нейрокомпьютеры и интеллектуальные роботы [Текст] / Н. М. Амосов, Т. Н. Байдык, Д. Гольцева [и др.]. — К.: Наукова думка, 1991. — 272 с.

- [5] *Архангельський, В. І.* Нейронні мережі в системах автоматизації [Текст] / В. І. Архангельський, І. М. Богаєнко, Г. Г. Грабовський, М. О. Рюмшин. — К. : Техніка, 1999. — 364 с.
- [6] *Белов, Н.* Противоминные подводные аппараты [Текст] / Н. Белов // Зарубежное обозрение. — 1990. — № 4. — С. 53–60.
- [7] *Блинцов, В. С.* Задачи совершенствования информационно-управляющих систем для малоразмерных скоростных судов [Текст] / В. С. Блинцов, Ван Ван Ван // Сб. научных работ УДМТУ. — Николаев : УДМТУ, 2002. — № 7 (385). — С. 140–146.
- [8] *Блінцов, С. В.* Автоматичне керування автономними підводними апаратами в умовах невизначеності [Текст] : монографія / С. В. Блінцов. — Миколаїв : ТОВ Фірма «Ліон», 2008. — 204 с.
- [9] *Гостев, В. И.* Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления [Текст] / В. И. Гостев. — К. : Радиоаматор, 2003. — 512 с.
- [10] *Звенигородский, А. С.* Нечеткая логика в управлении мобильным роботом [Текст] / А. С. Звенигородский // Искусственный интеллект. — 1998. — № 1. — С. 63–67.
- [11] *Ивахненко, А. Г.* Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления [Текст] / А. Г. Ивахненко. — К. : Техника, 1969. — 324 с.
- [12] *Киселев, Л. В.* Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований [Текст] / Л. В. Киселев, А. В. Инзарцев, Ю. В. Матвиенко // Подводные исследования и робототехника. — 2006. — № 1. — С. 6–17.
- [13] *Мак-Каллок, У. С.* Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности [Текст] / У. С. Мак-Каллок, В. Питтс // Автоматы. — М. : Изд-во иностр. лит., 1956. — С. 363–384.
- [14] *Пат. Японії JP6107279, МКИ В63G8/14.* Control method and device of remotely operated vehicle [Text] / Yoshida Yuuki, Takahashi Yoshiaki. — Опубл. 19.04.1994.
- [15] *Понырко, С. А.* Адаптивные системы для освоения океана [Текст] / С. А. Понырко, О. С. Попов, В. С. Ястребов. — СПб. : Судостроение, 1993. — 224 с.
- [16] *Рассел, С.* Искусственный интеллект: современный поход [Текст] : [пер. с англ.] / С. Рассел, П. Норвиг. — М. : Изд. дом «Вильямс», 2006. — 1408 с.
- [17] *Свечников, С. В.* Нейротехнические системы обработки информации [Текст] / С. В. Свечников, А. М. Шквар. — К. : Наукова думка, 1983. — 224 с.
- [18] *Слижевский, Н. Б.* Ходкость и управляемость подводных технических средств [Текст] : учеб. пособие / Н. Б. Слижевский. — Николаев : УГМТУ, 1998. — 148 с.
- [19] *Филаретов, В. Ф.* Устройства и системы управления подводных роботов [Текст] / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев, Д. А. Юхимец. — М. : Наука, 2005. — 270 с.
- [20] *Ястребов, В. С.* Алгоритмы адаптивного движения подводного робота [Текст] / В. С. Ястребов, С. В. Армишев. — М. : Наука, 1988. — 87 с.
- [21] *Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations.* Committee on Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations, National Research Council [Text]. — Washington, D.C. : The National Academies Press, 2005. — 256 p.
- [22] *Button, Robert W.* A Survey of Missions for Unmanned Undersea Vehicles [Text] / John Kamp, Thomas B. Curtin, James Dryden. — Santa Monica, CA : The RAND Corporation, 2009. — 224 p.
- [23] *The Navy Unmanned Undersea Vehicle (UUV) Master Plan* [Text] // U.S. Department of the Navy. — November 2004. — P. 16.