

УДК 623.958.2
Б 69

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПІДВОДНИХ ПОШУКОВО-ОБСТЕЖУВАЛЬНИХ РОБІТ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ АВТОНОМНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА-РОБОТА

С. В. Блінцов, канд. техн. наук, доц.¹
Р. В. Вакар, старш. наук. співроб.²

¹Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

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

Анотація. Наведено аналітичні залежності для планування місій пошуково-обстежувальних автономних підводних апаратів-роботів (АПР), оптимальних за критеріями продуктивності та енергетичної ефективності. Розроблено структурну схему автоматизованого планування місій АПР як основу створення спеціалізованого програмно-апаратного комплексу, призначеного для синтезу оптимальних систем автоматичного керування АПР.

Ключові слова: автономний підводний апарат-робот, система автоматичного керування, експлуатаційна ефективність, планування підводних місій, пошуково-обстежувальні роботи.

Аннотация. Приведены аналитические зависимости для планирования миссий поисково-обследовательских автономных подводных аппаратов-роботов (АПР), оптимальных по критериям производительности и энергетической эффективности. Разработана структурная схема автоматизированного планирования миссий АПР как основа создания специализированного программно-аппаратного комплекса, предназначенного для синтеза оптимальных систем автоматического управления АПР.

Ключевые слова: автономный подводный аппарат-робот, система автоматического управления, эксплуатационная эффективность, планирование подводных миссий, поисково-обследовательские работы.

Abstract. The analytical relationships for mission planning of the search and inspecting works by autonomous underwater vehicles, that are efficient for their capacity and power, are given. The structural scheme of the automated underwater vehicle mission planning is developed as the base for special hardware-software complex, designed for synthesis of automatic control optimum systems of the autonomous underwater vehicles.

Keywords: autonomous underwater vehicle, automatic control system, operational efficiency, underwater mission planning, search and inspecting works.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проведення підводних пошуково-обстежувальних робіт є однією з типових морських операцій, що виконується військово-морськими силами й спеціальними підрозділами морських держав в інтересах промислових підприємств та силових структур [8, 9, 17].

Оперативність і достовірність таких робіт при їх розгортанні на значних за площею акваторіях напряму впливають на ефективність морської діяльності держави, її обороноздатність та міжнародний авторитет.

Традиційно пошуково-обстежувальні роботи виконуються надводними суднами із

застосуванням гідроакустичної, магнітометричної та відеоапаратури, що буксирується, а також із залученням водолазів [1, 11]. Проте вказані технології є дорогими, суттєво залежать від гідрометеорологічних умов на морі та не забезпечують ефективного пошуку малорозмірних підводних об'єктів на великих глибинах.

Сучасний етап розвитку підводних пошуково-обстежувальних технологій характеризується використанням самохідних автономних підводних апаратів-роботів (за англійською термінологією AUV — Autonomous Underwater Vehicle), до переваг яких належать велика тривалість підводної місії, висока роздільна здатність при пошуку малорозмірних цілей, незалежність від погодних умов та висока скритність роботи [2]. Головною складністю, що обмежує ефективне застосування такого виду підводної робототехніки, є необхідність створення високоефективних систем автоматичного керування (САК) просторовим рухом АПР, які б забезпечували рух по заданих траєкторіях і адекватно реагували на експлуатаційні невизначеності (зовнішні збурення водного середовища та навігаційні перешкоди).

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розробка методів синтезу систем автоматичного керування просторовим рухом АПР постійно знаходиться в центрі уваги дослідників та проектувальників підводних роботів [6, 14, 15]. При цьому головні зусилля розробників сконцентровано на нижніх (виконавчих) рівнях багаторівневих САК, в яких успішно вирішуються задачі підвищення точності траєкторного руху АПР. Значно менша кількість робіт присвячена верхньому (стратегічному) та середньому (тактичному) рівням САК [4]. На цих рівнях розв'язуються відповідно задачі виконання місії у цілому з контролем досягнення узагальнюючих показників (ефективність, безпека) та задачі тактичного забезпечення виконання місії в умовах дії збурень, перешкод тощо.

Зокрема, на цей час відсутні роботи із синтезу математичного й алгоритмічного забезпечення, яке призначене для автоматизо-

ваного планування та виконання підводних місій АПР.

МЕТОЮ РОБОТИ є аналіз сучасних підходів до планування підводних місій автономних підводних апаратів-роботів та розробка математичних основ і узагальненої структурної схеми автоматизованого планування місії для пошуково-обстежувальних АПР.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Сучасні технології застосування АПР характеризуються широким спектром робочих режимів: від квазістаціонарних (позиціонування у точці, рух по еквідистанті, стабілізація на курсі) до маневрових (акселеративний рух, зміна курсу, глибини тощо) [3]. Планування місії (підводних завдань) на сьогодні виконується переважно вручну або з використанням простих програмних засобів, які дають змогу задати множину можливих траєкторій АПР на базі сполучення простих прямолінійних, кругових та зигзагоподібних елементів [12].

При цьому програмний рух на тактичному рівні системи автоматичного керування АПР задається трьома способами:

кусково-лінійними залежностями планових швидкості руху $v(t)$, курсу $\varphi(t)$, кутової швидкості $d\varphi/dt$, глибини занурення $H(t)$ чи висоти руху над ґрунтом $h(t)$ на інтервалі часу T ($t \in T$);

за координатними заданнями точок $\{x_i, y_i, z_i\}$ заданої траєкторії з регулярним чи довільним кроком, де $i \in N$, N — розмір масиву точок заданої траєкторії руху АПР;

за даними бортових приладів — вимірювачів фізичних величин, коли АПР рухається на виявлене підводне джерело фізичних полів (у тому числі й рухоме).

Перший спосіб передбачає застосування в САК законів стабілізації руху АПР за курсом, глибиною чи висотою ходу над ґрунтом з контролем заданого інтервалу часу, протягом якого АПР повинен витримувати стабілізований рух.

Другий спосіб не вимагає стабілізованого руху на відрізьку між двома сусідніми точками траєкторії, проте передбачає проміжний контроль допустимого кута пеленга

та контроль графіка часу проходження заданих точок траєкторії з коригуванням елементів руху АПР.

Третій спосіб вимагає постійного коригування курсу й висоти над ґрунтом при широкому діапазоні маневрування лінійною та кутовою швидкостями.

Крім того, задаються також режими завищення над об'єктом та динамічного позиювання у заданій точці підводного простору, які реалізуються з використанням старто-стопних, реверсивних і лагових режимів роботи рушійного комплексу АПР.

Планування місій АПР виконується заздалегідь у берегових умовах чи на судні-носії із застосуванням лінгвістичних чи графічних засобів [12, 16].

Характерним напрямком розвитку сучасних систем автоматичного керування просторовим рухом АПР є розробка спеціальних графічних редакторів для опису й задання підводних місій, які оперують із закінченими операційними блоками типу «Рух з параметрами ...», «Перехід до точки з координатами ...», «Слідкування за об'єктом з параметрами ...» [18].

Перспективним напрямком удосконалення системи автоматичного керування рухом АПР є також застосування теорії нечітких множин та нечіткої логіки для керування в умовах недостовірних навігаційних даних [13].

Проведений аналіз свідчить, що теорія планування місій АПР знаходиться на початковій стадії розвитку. Досвід авторів у створенні нових зразків підводної техніки дає змогу констатувати, що на цей час перспективним напрямком її подальшого розвитку є автоматизація процесу планування місій пошуково-обстежувального АПР з урахуванням критеріїв його експлуатаційної ефективності. До таких критеріїв у першу чергу необхідно віднести:

безпеку АПР — рух АПР з показниками ризиків, які не перевищують проектних (удар у перешкоду, посадка на ґрунт, перевищення максимальної глибини занурення, перевищення гранично-допустимого розряду акумуляторів тощо);

якість виконання місії — точність підтримання квазістаціонарних та динамічних

параметрів руху, задана роздільна здатність інформації від АПР тощо;

продуктивність виконуваних пошуково-обстежувальних робіт;

енергетична ефективність виконання місії АПР — вибір енергетично оптимальних швидкостей руху, прискорень і просторових маневрів.

Розглянемо більш детально останні два критерії, оскільки вони є базовими і такими, що визначають доцільність створення й застосування АПР у цілому.

Продуктивність та енергетичну ефективність АПР визначимо у вигляді наступних відношень [7]:

$$Q_M = \frac{S_M}{T_M}; W_M = \frac{S_M}{E_M},$$

де S_M , T_M , E_M — обстежена площа донної поверхні та витрати часу й енергії джерела живлення АПР при виконанні ним підводної місії відповідно.

Виходячи із цього, пропонується планування місії АПР виконувати як розв'язок задачі про досягнення максимальної продуктивності

$$Q_M(E_M) \rightarrow \max \quad (1)$$

за наявності обмежень з енергоємності бортового джерела живлення (акумулятора) та максимальної швидкості v_{\max} поступального руху АПР вигляду

$$k_{z.e} \cdot E_M \leq E_{\text{АПР}}; 0 \leq v \leq v_{\max},$$

де $k_{z.e} > 1$ — коефіцієнт запасу з енергоживлення АПР; v — поточне значення швидкості поступального руху АПР.

Розглянемо основні аналітичні залежності, які описують місію АПР для випадку, коли необхідно вести обстеження площі донної поверхні прямокутної форми ($S_M = A \times B$, де A , B — сторони підводної робочої зони). Схема обстеження прямолінійними галсами наведена на рис. 1.

Загальні витрати часу на виконання підводної місії містять наступні складові:

$$T_M = T_n + T_{\text{сп}} + T_{v1} + T_p + T_{v2} + T_{\text{пд}} + T_k, \quad (2)$$

де T_n — витрати часу на підготовку АПР до роботи на борту судна-носія (тестування, завантаження завдання на виконання місії); $T_{\text{сп}}$, $T_{\text{пд}}$ — відповідно витрати часу на спуск

АПР на воду та його підйом з води на палубу судна-носія (виконуються палубними механізмами судна-носія); $T_{в1}, T_{в2}$ — відповідно витрати часу на перехід АПР від борту судна-носія до робочої зони і його повернення до судна-носія (на рис. 1 — це переходи «Т.1–Т.2» та «Т.16–Т.1»); T_p — витрати часу на виконання пошуково-обстежувальних робіт у робочій зоні (на рис. 1 — це рух по точках маршруту «Т.2–Т.16»); T_k — витрати часу на передачу інформації про результати обстеження з носіїв АПР на носії судна-носія і контроль працездатності АПР після виконання місії.

Очевидно, що виконання підводним роботом окремого галса складається з двох частин: маневрування з метою виходу на заданий галс та руху заданим галсом. Тому витрати часу T_p також містять дві складові:

$$T_p = T_3 + T_r \tag{3}$$

де T_3, T_r — відповідно витрати часу на виконання маневрів для заходу АПР на задані галси та виконання цих галсів.

Залежності, за якими визначаються складові часу T_3, T_r мають вигляд

$$T_3 = (n-1) \frac{l_3}{v_3}; \tag{4}$$

$$T_r = n \frac{l_r}{v_r} + Z \cdot T_z + C \cdot T_{сеп}, \tag{5}$$

де $n = L_r/l_r$ — кількість галсів місії ($L_r = S_M \cdot k_r/b$ — сумарна довжина всіх галсів місії; $k_r > 1$ — коефіцієнт перекриття смуги обстеження донної поверхні; b — ширина смуги обстеження пошуковим комплексом АПР); $l_r = sup(A, B)$ — довжина одиничного галса; l_3 — довжина маневру АПР при заході на наступний галс; v_3, v_r — відповідно швидкість руху АПР при маневруванні та виконанні галса; Z — кількість навігаційних перешкод, подолати які має АПР при виконанні місії; T_z — середні витрати часу на подолання навігаційної перешкоди; C — кількість цілей, детальне обстеження яких повинен виконати АПР протягом місії; $T_{сеп}$ — середні витрати часу на обстеження однієї підводної цілі.

Приймаючи до уваги, що енергоспоживання АПР, в основному, визначається його рушійним комплексом, загальні витрати енергії на виконання підводної місії містять складові

$$E_m = E_{в1} + E_p + E_{в2}, \tag{6}$$

де $E_{в1}, E_{в2}$ — відповідно витрати енергії на перехід АПР від борту судна-носія до робо-

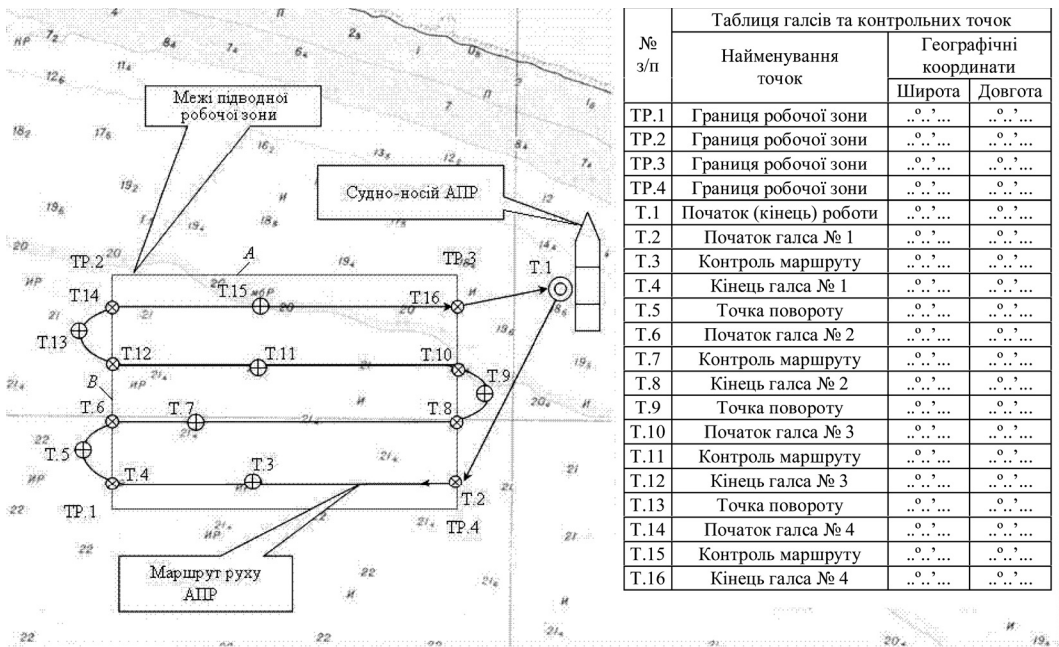


Рис. 1. Схема виконання місії (обстеження робочої зони)

чої зони та його повернення до судна-носія; E_p — витрати енергії на виконання пошуково-обстежувальних робіт у робочій зоні.

Оскільки виконання підводним роботом окремого галса складається з двох частин — маневрування з метою виходу на заданий галс та руху заданим галсом, то витрати енергії за аналогією з виразом (3) також містять дві складові:

$$E_p = E_3 + E_r \quad (7)$$

де E_3, E_r — відповідно витрати енергії на виконання маневрів для заходу АПР на задані галси та їх виконання.

Нехтуючи енерговитратами перехідних процесів при маневруванні АПР унаслідок їх малості у порівнянні з енерговитратами на усталений рух, отримуємо залежності для визначення складових:

$$E_3 = K_3 \cdot T_3 \cdot v_3^3 = (n-1) \cdot K_3 \cdot l_3 \cdot v_3^2; \quad (8)$$

$$E_r = n \cdot K_r \cdot l_r \cdot v_r^2 + Z \cdot K_Z \cdot T_Z \cdot v_Z^3 + C \cdot K_C \cdot T_{cep} \cdot v_C^3, \quad (9)$$

де $K_3 = 0,5 \cdot \rho \cdot C_3 \cdot \Omega_3$; $K_r = 0,5 \cdot \rho \cdot C_r \cdot \Omega_r$; $K_Z = 0,5 \cdot \rho \cdot C_Z \cdot \Omega_Z$; $K_C = 0,5 \cdot \rho \cdot C_C \cdot \Omega_C$ (ρ — питома густина води; C_3, C_r, C_Z, C_C — безрозмірні коефіцієнти гідродинамічного опору АПР для режимів відповідно заходу на галс, руху заданим галсом, при обминанні навігаційної перешкоди та обстеженні цілі; $\Omega_3, \Omega_r, \Omega_Z, \Omega_C$ — характерні для АПР розміри (у загальному випадку $C_3 \neq C_r \neq C_Z \neq C_C$ та $\Omega_3 \neq \Omega_r \neq \Omega_Z \neq \Omega_C$ унаслідок режимних особливостей).

Відношення (2)–(9) утворюють математичне підґрунтя для пошуку оптимальних режимів роботи АПР. Проте їх ефективне використання можливе лише після первинних оцінок власних параметрів АПР (гідродинамічних коефіцієнтів корпусу робота тощо) та зовнішніх впливів (навігаційних перешкод і параметрів зовнішнього середовища) на базі спеціалізованого моделюючого комплексу. Це обумовлено тим, що у рівняннях (2) і (6) присутні складові, які є залежностями від швидкості руху АПР v .

Пошук оптимальних значень швидкостей руху v_3 та v_r пошуково-обстежувального АПР вручну з урахуванням нелінійних залежностей (8) і (9) є складною задачею, яка

потребує використання експериментальних даних про функціонування підводного робота у відповідних режимах його експлуатації та конкретних навігаційних і гідрометеорологічних умовах. Практичне отримання таких даних можливе тільки шляхом проведення трудомістких і дорогих басейнових та морських натурних випробувань, тому пропонується наступна узагальнена структурна схема для автоматизації пошуку цих значень на базі спеціалізованого моделюючого комплексу за критеріями продуктивності Q_m й енергетичної ефективності W_m (рис. 2).

Дамо опис блоків структурної схеми у порядку їх нумерації.

Блок 1. База даних спеціалізованого моделюючого комплексу містить вихідні дані про АПР як об'єкт керування, навігаційну обстановку та гідрометеорологічні умови в районі виконання пошуково-обстежувальних робіт, а також формалізовані дані про досвід експлуатації АПР на попередніх стадіях його застосування. Побудова такої бази даних може бути здійснена за принципами, викладеними в роботах [5, 10].

Блок 2. Блок генерації місії АПР передбачає побудову нової чи вибір однієї з раніше апробованих місій і являє собою групу фахівців з підводних роботизованих технологій та замовників підводної роботи, які методом експертних оцінок обирають найбільш доцільний для заданих умов варіант місії.

Блок 3. Блок автоматизованого планування обраної місії власне і виконує її операційну розробку за заданими критеріями оптимальності. У нашому випадку — це розробка траєкторій просторового руху за критерієм оптимальності (1) із використанням відношень (2)–(9).

Блоки 4–6. Вказані блоки утворюють ієрархічну трирівневу математичну модель системи автоматичного керування АПР, функціонування якої досить повно описане в роботах [5, 6]. Рівень стратегічного керування (блок 4) забезпечує виконання місії АПР у цілому згідно з прийнятими інтегральними критеріями якості пошуково-обстежувальних робіт, їх продуктивності та енергетичної ефективності.

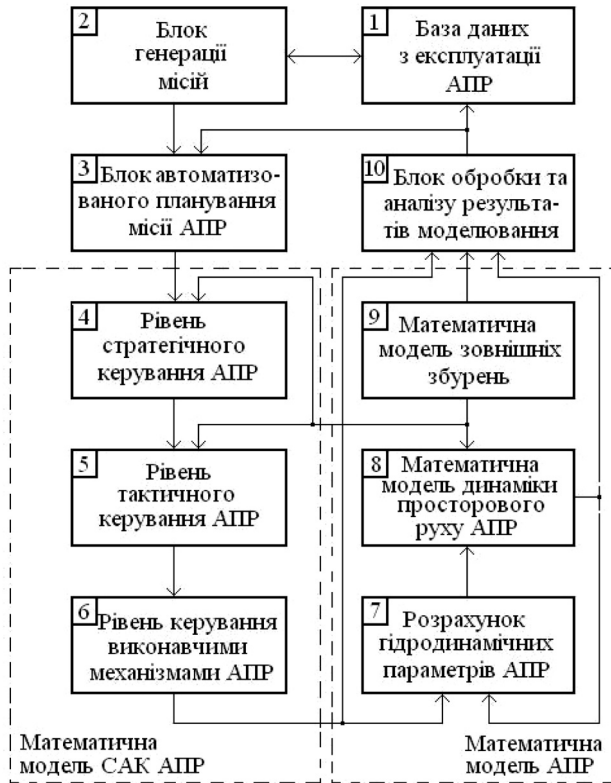


Рис. 2. Узагальнена структурна схема автоматизованого планування місії для пошуково-обстежувальних автономних підводних апаратів-роботів на базі спеціалізованого моделюючого комплексу

Рівень тактичного керування (блок 5) забезпечує досягнення стратегічних завдань місії в умовах невизначеності зовнішніх збурень та нестационарності власних гідродинамічних параметрів АПР, а також реалізує алгоритми керування підводним роботом під час руху в складних навігаційних умовах (складний рельєф дна, наявність підводних перешкод тощо). У ньому моделюються процеси ідентифікації навігаційних перешкод та генеруються алгоритми її обминання за обраним критерієм. На цьому рівні реалізуються також функції контролю за працездатністю апаратної та програмної складових АПР, функції їх діагностики тощо.

Рівень керування виконавчими механізмами АПР (блок 6) забезпечує узгоджене керування групами виконавчих механізмів робота (рушійним комплексом, зовнішніми приладами та інструментами) з метою досягнення цілей керування більш високих рівнів. Він містить n САК, кожна з яких

включає у себе блок опорних програм, що задають закони руху АПР по відповідних осях, та регулятори для їх реалізації шляхом керуючого впливу на виконавчі механізми (електродвигуни рушіїв тощо).

Блоки 7–9 утворюють математичну модель функціонування АПР у квазістационарних і динамічних режимах, яка будується за відомими рівняннями [2]. При цьому блок 7 моделює зміну гідродинамічних характеристик АПР при його русі у косому потоці води, зміні положення зовнішніх антен, приладів та інструментів підводного робота [6]. Блок 9 формує віртуальне середовище, в якому функціонує АПР, шляхом моделювання дії зовнішніх збурень на АПР: підводних перешкод, течій тощо.

Блок 10 виконує обробку результатів моделювання, отриманих від моделі АПР у режимах його квазістационарного і динамічного рухів, та аналіз результатів місії на відповідність прийнятим критеріям

оптимізації. Результати роботи цього блока надходять до блока 3 для оперативного коригування моделі системи автоматичного керування АПР та бази даних з експлуатації АПР (блок 1) для її поповнення і використання при плануванні подальших місій підводного робота.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу сучасних підходів до планування підводних місій автономних підводних апаратів-роботів визначено перспективність автоматизації процесу планування місій пошуково-обстежувального АПР з

урахуванням критеріїв його експлуатаційної ефективності: безпеки руху АПР та якості виконання ним підводної місії. 2. Наведено основні аналітичні залежності для планування місій пошуково-обстежувальних АПР, оптимальних за критеріями продуктивності та енергетичної ефективності. 3. Розроблено структурну схему автоматизованого планування місій пошуково-обстежувального АПР як основу створення програмно-апаратного комплексу, призначеного для синтезу оптимальних систем автоматичного керування автономними підводними апаратами-роботами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *Абчук, В. А.* Поиск объектов [Текст] / В. А. Абчук, В. Г. Суздаль. — М. : Советское радио, 1977. — 334 с.
- [2] Автономные необитаемые подводные аппараты [Текст]; под общ. ред. акад. М. Д. Агеева. — Владивосток : Дальнаука, 2000. — 272 с.
- [3] Автономные подводные роботы. Системы и технологии [Текст]; под общ. ред. акад. М. Д. Агеева. — М. : Наука, 2005. — 398 с.
- [4] *Агеев, М. Д.* Некоторые вопросы управления АНПА при обследовании подводных гор [Текст] / М. Д. Агеев, А. В. Инзарцев, Л. В. Киселев // Морские технологии. — 2000. — Вып. 3. — С. 46–55.
- [5] *Блинцов, В. С.* Современные проблемы создания электрооборудования и автоматики подводных аппаратов [Текст] / В. С. Блинцов // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал / Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». — 2007. — № 5 (24). — С. 90–98.
- [6] *Блінцов, С. В.* Автоматичне керування автономними підводними апаратами в умовах невизначеності [Текст] / С. В. Блінцов : монографія. — Миколаїв : ТОВ Фірма «Іліон», 2008. — 204 с.
- [7] *Бреслав, Л. Б.* Технично-экономическое обоснование средств освоения мирового океана [Текст] / Л. Б. Бреслав. — Л. : Судостроение, 1982. — 240 с.
- [8] ГОСТ Р 22.8.07–99. Аварийно-спасательные работы при ликвидации чрезвычайных ситуаций, вызванных опасными гидрологическими явлениями на акваториях [Текст]. — Введ. 2000–01–01. М. : Госстандарт России, 1999. — 8 с.
- [9] *Дикарев, В. И.* Методы и средства обнаружения объектов в укрывающих средах [Текст] / В. И. Дикарев, В. А. Заренков, Д. В. Заренков. — С.Пб. : Наука и техника, 2004. — 280 с.
- [10] *Еремеев, В. Н.* Банк океанологических данных МГИ НАН Украины: современное состояние, использование черноморским океанографическим сообществом и перспективы развития [Текст] / В. Н. Еремеев, Е. А. Годин, А. Х. Халиулин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — 2005. — Вып. 13. — С. 394–405.
- [11] *Жуков, Р. Ф.* Системы, приборы и устройства подводного поиска [Текст] / Р. Ф. Жуков, А. А. Кондратович, С. Д. Могильный. — М. : Воениздат, 1972. — 184 с.

- [12] *Киселев, Л. В.* О некоторых задачах динамики и управления пространственным движением АНПА [Текст] / Л. В. Киселев, А. В. Инзарцев, Ю. В. Матвиенко // Подводные исследования и робототехника. — 2006. — № 2. — С. 16–26.
- [13] *Киселев, Л. В.* О некоторых особенностях динамической модели АНПА с элементами нечеткой логики [Текст] / Л. В. Киселев, А. В. Инзарцев, А. В. Медведев // Морские технологии. — 2003. — Вып. 5. — С. 18–31.
- [14] *Пшихопов, В. Х.* Позиционно-траекторное управление подвижными объектами [Текст] / В. Х. Пшихопов. — Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. — 183 с.
- [15] *Филаретов, В. Ф.* Устройства и системы управления подводных роботов [Текст] / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев, Д. А. Юхимец. — М. : Наука, 2005. — 270 с.
- [16] *Button, Robert W.* A Survey of Missions for Unmanned Undersea Vehicles [Text] / Robert W. Button, John Kamp, Thomas B. Curtin, James Dryden. — Santa Monica, CA : The RAND Corporation, 2009. — 224 p.
- [17] *Niu, H.* Applications of Autonomous Underwater Vehicles in Offshore Petroleum Industry [Text] / H. Niu, S. Adams, T. Husain, N. Bose, K. Lee : materials of Canadian International Petroleum Conference «Environmental Effects Monitoring». — 2007. — 6 p.
- [18] *Patterson, M. R.* A Finite State Machine Approach to Layered Command and Control of Autonomous Underwater Vehicles Implemented in G, a Graphical Programming Language [Text] / M. R. Patterson : proceedings of Ocean Community Conference. — Baltimore, 1998. — P. 745–751.