

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОСТОРОВИМ РУХОМ БУКСИРУВАНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Блінцов В. С., Блінцов О. В., Соколов В. В.

1. Вступ

Буксировані підводні системи (БПС) успішно застосовуються для виконання пошукових підводних робіт на великих площах морських акваторій. Вони мають ряд переваг для такого виду робіт у порівнянні з телекерованими та автономними підводними апаратами [1, 2]. Носієм технологічного обладнання в БПС є буксирований підводний апарат (БПА), який може здійснювати:

- гідроакустичний, магнітометричний та візуальний пошук підводних об'єктів;
- спостереження за підводним середовищем і підводними об'єктами;
- вимірювання океанографічних і геофізичних характеристик Світового океану;
- пошуку та розвідку корисних копалин;
- фото-, відео- і гідроакустичне документування та картографування морського дна і затонулих об'єктів.

Сучасне технологічне обладнання БПА (спеціалізовані сенсори, відеокамери тощо) дають змогу отримувати необхідну інформацію в реальному часі. Для забезпечення якісної їх роботи носій технологічного обладнання, тобто БПА, повинен мати можливість здійснювати довготривалий керований рух в підводному просторі із заданими динамічними параметрами [3]. При цьому БПС з БПА функціонує в умовах невизначеності зовнішніх збурень та нестаціонарності власних експлуатаційних параметрів. Якісне керування таким об'єктом у ручному режимі не завжди можливо. У зв'язку з цим автоматизація керування просторовим рухом БПА представляє собою актуальну наукову задачу.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є просторовий рух БПА, який працює у складі БПС. Конструктивною особливістю БПА є відсутність рушійних пристроїв, у зв'язку з цим вони приводяться до руху судном-буксирувальником (СБ), яке рухається зі швидкістю $\vec{v}_{tow}$, через кабель-буксир (КБ) (рис. 1) [4, 5].

Основною задачею керування БПА є забезпечення бажаної динаміки його поступального переміщення. Розглядається БПА проекту «Планер-2» [6]. Як об'єкт керування він має два керовані ступені рухливості:

- поступальний рух у вертикальній площині (керована зміна глибини);
- поступальний рух у горизонтальній площині (кероване бокове переміщення).

Для повороту кожного керуючого крила застосовується автоматизований електропривод.

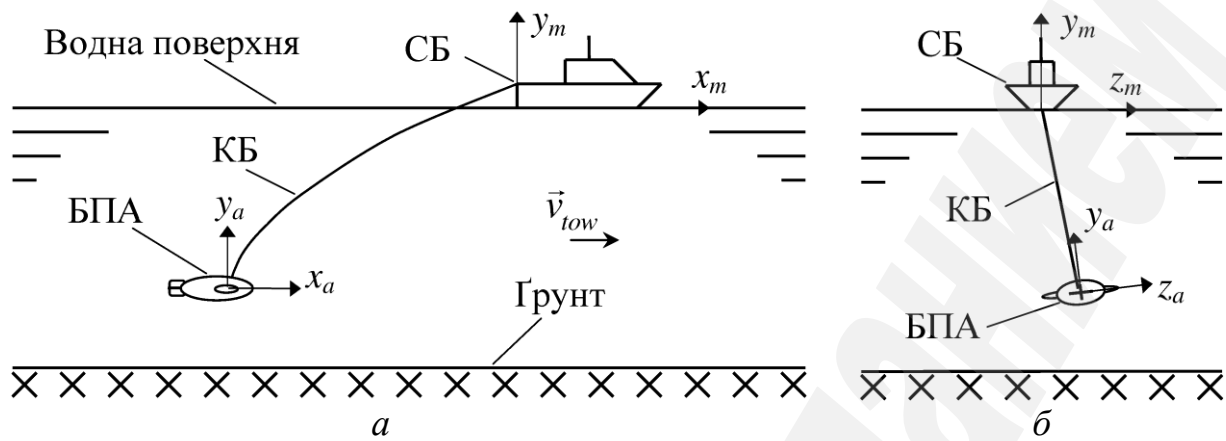


Рис. 1. Одноланкова буксирована підводна система:

a – вид на правий борт; *б* – вид на корму

Керуючим впливом для БПА проекту «Планер-2» є вектор-рядок $\bar{u}$:

$$\bar{u} = \{u_{left}, u_{right}\}; u_{left} \in [-1, 1]; u_{right} \in [-1, 1],$$

де u_{left} – сигнал керування для лівого керуючого крила; u_{right} – сигнал керування правого керуючого крила.

При цьому при $u_{left}=u_{right}$ крен БПА дорівнюватиме нулю і керованою буде лише глибина БПА за рахунок зміни диферента БПА. Останній в цьому випадку керується синхронною зміною керуючих впливів для лівого та правого крил. Якщо $u_{left} \neq u_{right}$, то з'явиться крен і БПА зміщуватиметься вбік. Таким чином, керування обертовими ступенями свободи (креном та диферентом) є основою для керування поступальними ступенями свободи (вертикальним та боковим переміщенням) БПА.

Керування в ручному режимі експлуатації можливе лише при виконанні короткострокових підводних місій. При цьому навіть досвідчений оператор не завжди може забезпечити певні режими руху та може допускати помилки при керуванні. Довготривалі підводні місії можливі лише за умови позмінної роботи операторів або із застосуванням БПС з автоматизованим БПА. Як об'єкт керування БПА представляє собою суттєво нелінійний об'єкт, який працює в умовах невизначеності. Тому системи автоматичного керування (САК), синтезовані на основі класичних методів, не в змозі забезпечити необхідну якість керування.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є автоматизація керування просторовим поступальним рухом буксированого підводного апарата без застосування похідних керованих величин в умовах невизначеності.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Синтезувати регулятори поступальних та обертових керованих параметрів буксированого підводного апарата.
2. Синтезувати САК просторовим рухом БПА в умовах невизначеності.

3. Методом комп'ютерного моделювання дослідити динаміку роботи синтезованої САК.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Синтезу систем автоматичного керування підводними апаратами та системами присвячено багато наукових публікацій.

Систему автоматичного керування БПА на основі спостерігача з високим коефіцієнтом підсилення та лінійно-квадратично-інтегральним регулятором запропоновано в [7]. Синтез регулятора передбачає застосування математичної моделі об'єкта керування і ускладнений в умовах невизначеності. Крім того, в моделі об'єкта керування автори застосували метод зосереджених мас та еластичних зв'язків, який потребує суттєвих обчислювальних ресурсів для моделювання нерозтяжного КБ.

Процесу керування спуско-підйомним пристроєм для стабілізації глибини БПА присвячено роботу [8]. Регулятор синтезовано шляхом представлення системи «КБ – БПА» фільтром низьких частот. Проте питання керованої зміни просторових координат БПА не розглядались.

Систему автоматичного керування курсом самохідного підводного апарата на основі пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора розроблено в [9]. Вона забезпечує плавне керування курсом при низькій швидкості руху, але є чутливою до параметричних похибок математичної моделі і не забезпечує високої точності керування.

Для синтезу САК самохідними підводними апаратами та іншими морськими рухомими об'єктами застосовується метод керування в режимі ковзання. Автоматизації керування безекіпажного надводного судна присвячено роботу [10]. Систему автоматичного керування рухом підводного апарата запропоновано в [11]. Основним недоліком керування в режимі ковзання є ефект високочастотного перемикання керуючого впливу між його граничними значеннями, що обмежує його застосування.

Систему високоточного керування глибиною підводного апарата на основі адаптивного нечіткого регулятора в режимі ковзання з пом'якшеним ефектом високочастотного перемикання запропоновано в [12] та розвинуто в [13]. Але якісне керування забезпечується в обмеженому діапазоні керованих параметрів, власних параметрів об'єкта та зовнішнього середовища. Невизначені збурюючі впливи легко виводять об'єкт керування за означені межі.

Робота [14] присвячена експериментальному дослідженню керованого руху БПА, проте систему керування реалізовано тільки для вертикальної координати. Просторовий рух БПА не розглядається.

Інтегровану САК морським комплексом запропоновано в [15], проте процес синтезу регуляторів виконавчого рівня САК в даній роботі не наводиться.

Систему автоматичного керування на базі ПІД-регулятора підводним апаратом запропоновано в [16]. Необхідна для регулятора інформація отримується зі спостерігача з високим коефіцієнтом підсилення. Проте отриманий результат непридатний для застосування в умовах невизначеності, оскільки для синтезу потребується математична модель об'єкта керування.

Аналіз літературних даних показує, що наукові публікації присвячені в основному автоматизації самохідних підводних апаратів. Проте для забезпечення високої динамічної точності застосовуються закони керування, які синтезуються на основі математичної моделі об'єкта керування та містять похідні керованої величини. Питання автоматичного керування просторовим рухом БПА в умовах невизначеності на цей час майже недосліджені.

5. Методи дослідження

5.1. Розробка узагальненої структури САК багатовимірним рухом БПА

Динаміка поступального руху БПА як твердого тіла, згідно основного закону динаміки, підпорядковується системі диференціальних рівнянь другого порядку, яку докладно описано в [17].

Проте БПА як керований об'єкт має наступну особливість. Поступальний рух БПА виникає внаслідок дії сил, які виникають в результаті взаємодії БПА з КБ та набігаючим потоком води. Первинні сили з'являються на БПА від КБ, що переміщує БПА по відношенню до водного середовища. Як тільки швидкість руху БПА по відношенню до води приймає ненульові значення, то одразу ж з'являються гідродинамічні сили на корпусі БПА, його несучих поверхнях (НП) та хвостовому оперенні (ХО). Для керування поступальним рухом БПА необхідно керовано змінювати вектор рівнодіючої сили $\vec{F}$. Оскільки БПА не обладнаний рушійними пристроями, то єдиний спосіб керовано змінювати $\vec{F}$ полягає у зміні кутової орієнтації БПА. Основні гідродинамічні сили виникають на НП, які нерухомо закріплені на корпусі БПА. Хвостове оперення дає змогу за рахунок зміни кутової орієнтації БПА змінювати вектор рівнодіючої сили $\vec{F}$. Таким чином, керування поступальними кінематичними параметрами БПА здійснюється шляхом керованої зміни обертових кінематичних параметрів БПА. У зв'язку з цим БПА як об'єкт керування представляє собою багатовимірний об'єкт четвертого порядку. Його обертовий рух підпорядковується системі диференціальних рівнянь другого порядку і є причиною зміни вектора рівнодіючої сили $\vec{F}$. Поступальний рух в свою чергу також описується системою диференціальних рівнянь другого порядку, що і утворює четвертий порядок об'єкта керування.

Навігаційні пристрої БПА дають змогу вимірювати обертові та поступальні координати БПА, що дає змогу забезпечити відповідні зворотні зв'язки. Тому САК просторовим рухом БПА синтезуємо, застосовуючи принцип підпорядкованого керування. Декомпозиція еталонної моделі [18] дає змогу виділити основний керуючий контур 2-го порядку для поступального руху та вкладений керуючий контур 2-го порядку для обертового руху (рис. 2).

Задача керування у вигляді заданих вертикальної $y_g(t)$ та бокової $z_g(t)$ координат надходить до регулятора поступального руху БПА. Об'єктом керування для регулятора поступального руху є БПА, автоматизований за обертовими ступенями свободи. Тому регулятор поступального руху генерує керуючі впливи у вигляді заданого значення псевдокрену θ'_g та псевдодиферента ψ'_g для САК обертовим рухом БПА (сутність параметрів θ'_g , θ' , ψ'_g та ψ' буде розглянуто в далі).

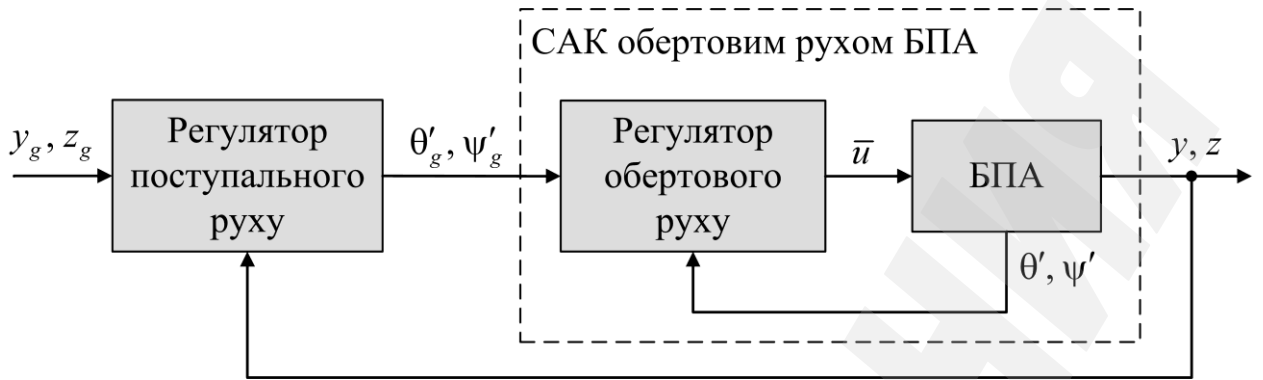


Рис. 2. Узагальнена структура системи автоматичного керування (САК) поступальним рухом буксированого підводного апарата (БПА)

Змінні θ'_g та ψ'_g утворюють задачу керування для регулятора обертового руху, який генерує керуючі впливи $\bar{u}$ безпосередньо для БПА. Задані (y_g та z_g) і фактичні (y та z) координати БПА подаються в проміжній системі координат (ПСК) $O_mx_my_mz_m$ – напівз'язаній з СБ системі координат. Також при керуванні БПА застосовується зв'язана система координат (ЗСК) $O_ax_ay_az_a$, яка переміщується і обертається разом з БПА, та кабельна система координат (КСК) $O_cx_cy_cz_c$, яка формується в залежності від взаємного розташування СБ та БПА. Докладно системи координат та рівняння зв'язку між ними розглянуто в [17, 19].

Для синтезу регуляторів 2-го порядку, які входять до складу САК, застосовуватимемо закон керування, синтезований на основі методу мінімізації локальних функціоналів [20]. Він дає змогу забезпечити високу динамічну точність в умовах невизначеності без застосування похідних керованої величини [21]:

$$\left. \begin{aligned}
 u(\hat{u}) &= \begin{cases} \hat{u}, & \text{при } \hat{u} \in [-1, 1]; \\ \text{sign}(e), & \text{інакше,} \end{cases} \quad s(\hat{u}) = \begin{cases} \text{false}, & \text{при } \hat{u} \in [-K_s, K_s]; \\ \text{true}, & \text{інакше;} \end{cases} \\
 \hat{u} &:= \sigma k \left(e + \frac{2}{T_r} e_i \right) + I_\chi(\chi, s, 0, t); \\
 e_i &:= I_e(e, s, e_{ilc}, t); \quad \chi = \frac{\sigma k}{T_r^2} e_i - hu; \\
 e_{ilc} &= \frac{T_r}{2\sigma k} [K_s \text{sign}(e) - \sigma k e]; \\
 k > 0; \quad \sigma &= \text{sign}\left(\frac{\partial \ddot{y}}{\partial u}\right); \quad K_s \geq 1,
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де u – обмежене значення керуючого впливу;

$\hat{u}$ – необмежене значення керуючого впливу;

s – ознака насичення контуру керування;

e – похибка керування;

K_s – коефіцієнт розширення зони допустимих значень $\hat{u}$;

σ – параметр, який забезпечує виконання правила знаків (докладну інформацію про правило знаків викладено в [20]);

k, h – коефіцієнти контуру керуючої функції;

T_r – постійна часу еталонної моделі САК;

e_i – інтеграл від похибки керування;

e_{iC} – початкове значення для інтегратора параметра e ;

χ – змінна, яка позначає підінтегральний вираз другого інтегралу закону керування;

y – керована величина, двома точками над змінною позначено другу похідну за часом;

$\text{sign}(\cdot)$ – функція взяття знаку;

$I_x(x, s, x_{iC}, t)$ – функція інтегрування.

Функція інтегрування $I_x(x, s, x_{iC}, t)$ приймає наступні аргументи:

– перший аргумент – це інтегрована змінна;

– другий аргумент – ознака насичення;

– третій аргумент – початкова умова інтегрування, вихід інтегратора приймає значення x_{iC} за умови $s=\text{true}$;

– останній аргумент – час.

5.2. Синтез САК просторовим рухом БПА

Синтез САК обертючим рухом БПА на основі закону керування (1) передбачає налаштування регуляторів псевдокрену та псевдодиферента БПА та узгодження їх роботи. Виходи регуляторів псевдокрену u_θ та псевдодиферента u_ψ узгоджені наступним чином:

$$u_{left} = u_\psi - u_\theta; \quad u_{right} = u_\psi + u_\theta.$$

Коригування початкових умов здійснюється в регуляторі з більшою похибкою. Інакше кажучи, якщо $s=\text{true}$, то скидаються (тобто в ролі вихідного значення подають початкову умову) інтегратори того регулятора, на вхід якого надходить більша похибка.

Поступальний рух БПА розглядається в ПСК $O_mx_my_mz_m$, напівзв'язаний з корпусом судна-буксирувальника. Керований поступальний рух БПА здійснюється в поперечній площині ПСК $O_my_mz_m$. Необхідно з'ясувати, як сигнали керування, що отримуються на виході регулятора поступального руху, тобто змінні θ'_g та ψ'_g , впливають на керовані параметри БПА, тобто змінні y та z (рис. 2).

Проаналізуємо динаміку руху БПА. Якщо задати крен на лівий борт ($\theta < 0$), то БПА переміщуватиметься вправо, якщо на правий борт ($\theta > 0$) – то вліво, якщо задати диферент на ніс, то БПА заглиблюватиметься, якщо на корму – то спливатиме.

В загальному випадку ХО дає змогу керувати кутовими прискореннями $\dot{\omega}_x$ та $\dot{\omega}_z$. А вплив кутових швидкостей ω_x та ω_z на кутову орієнтацію БПА залежить від поточних значень кутів Ейлера БПА. Якщо БПА має крен на один з бортів $\theta = \pm 90^\circ$, то диферент буде некерованим і БПА не зможе здійснювати кероване заглиблення, натомість з'явиться можливість керувати боковою координатою БПА O_mz_m .

Керуюча сила $\vec{F}_p$, яка забезпечує переміщення БПА в площині $O_m y_m z_m$, формується несучою поверхнею. Аналіз динаміки руху БПА, показує наступне:

- обертання БПА навколо зв'язаної з БПА осі $O_a x_a$ дає змогу керувати напрямком $\vec{F}_p$ в площині $O_m y_m z_m$;

- обертання БПА навколо зв'язаної з БПА осі $O_a z_a$ дає змогу керувати абсолютним значенням $\vec{F}_p$ та змінювати її напрямок на протилежний в площині $O_m y_m z_m$.

Враховуючи особливість впливу керуючої сили $\vec{F}_p$ на поступальний рух БПА в регуляторі поступального руху БПА пропонується застосовувати полярну систему координат при формуванні задачі керування та сигналів зворотного зв'язку (рис. 3, а).

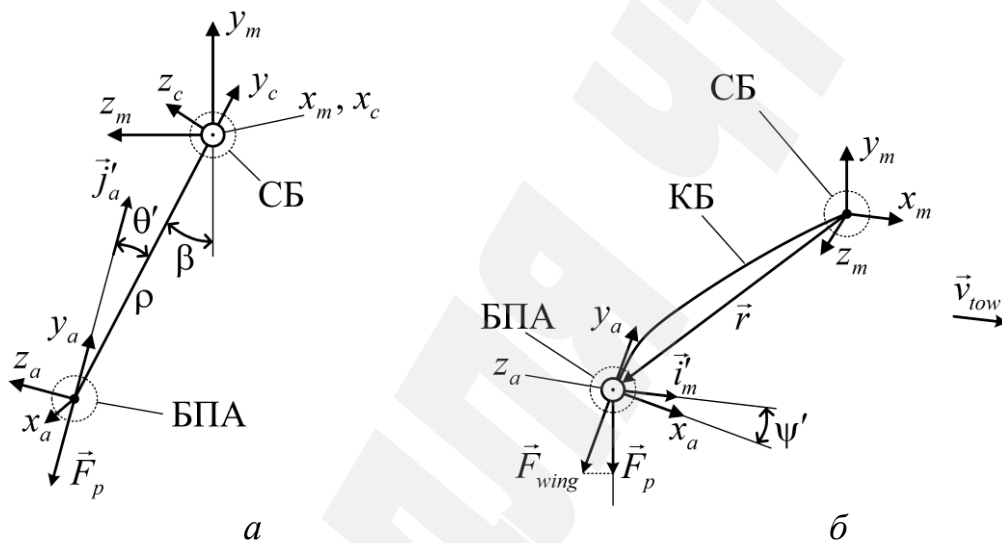


Рис. 3. Елементи буксированої підводної системи (БПС): *а* – елементи БПС в площині $O_m y_m z_m$ проміжної системи координат; *б* – елементи БПС в площині $O_a x_a y_a$ зв'язаної системи координат

Символ « $\odot$ » показує, що вісь, яку він позначає, спрямована в напрямку спостерігача. Вважаємо, що вісь $O_m x_m$ співпадає зі швидкістю буксування $\vec{v}_{tow}$, оскільки СБ рухається носом проти набігаючого потоку води.

Відстань між СБ та проекцією центра мас БПА на площину $O_m y_m z_m$ позначено змінною ρ :

$$\rho = \sqrt{y^2 + z^2},$$

де y та z – керовані координати БПА в ПСК.

Кут β представляє собою кут між радіус-вектором, який з'єднує СБ з проекцією центру мас БПА на площину $O_m y_m z_m$, та вертикальною віссю ПСК $O_m y_m$, взятою в зворотному напрямку:

$$\beta = f_{polar}(-y, -z);$$

$$f_{polar}(a, b) = \begin{cases} \arctg \frac{b}{a}, & \text{при } a > 0; \\ \arctg \frac{b}{a} + 180^\circ, & \text{при } a < 0 \wedge b \geq 0; \\ \arctg \frac{b}{a} - 180^\circ, & \text{при } a < 0 \wedge b < 0; \\ 90^\circ, & \text{при } a = 0 \wedge b > 0; \\ -90^\circ, & \text{при } a = 0 \wedge b < 0; \\ \text{невизначеність}, & \text{при } a = 0 \wedge b = 0, \end{cases}$$

де $f_{polar}(\cdot)$ – функція, яка обчислює полярний кут на основі декартових координат в діапазоні $(-180^\circ, 180^\circ]$; a, b – аргументи функції $f_{polar}(\cdot)$.

Таке визначення β дає $\beta < 0$ при $z > 0$ та $\beta > 0$ при $z < 0$. Це необхідно для того, щоб знак крену θ співпадав зі знаком прискорення параметра β .

Таким чином, поточні координати БПА утворюються парою $\{\rho, \beta\}$. Задані координати БПА утворюються парою $\{\rho_g, \beta_g\}$ і отримуються аналогічним чином на основі заданих декартових координат x_g та y_g .

Для керування напрямом $\vec{F}_p$ введемо кут псевдокрену θ' . Він утворюється між вектором $\vec{j}'_a$ та проекцією радіус-вектора $\vec{r}$, який з'єднує СБ з БПА, на площину $O_m y_m z_m$ (рис. 3, а). Вектор $\vec{j}'_a$ представляє собою проекцію базисного вектора $\hat{j}_a$ ЗСК на площину $O_c y_c z_c$ КСК (а також на площину $O_m y_m z_m$ ПСК).

Для розрахунку параметра θ' застосуємо кабельну систему координат. Спочатку знайдемо матрицю зв'язку між ПСК та КСК K_{CM} . Орт осі абсцис КСК $\hat{i}_c$ співпадає з відповідним ортом ПСК $\hat{i}_m$:

$$\hat{i}_c = \{i_{c.x.m}, i_{c.y.m}, i_{c.z.m}\}_M = \{1, 0, 0\}_M.$$

Тут і далі для позначення координат базисних векторів застосовуватимемо наступну нотацію. Першим символом індексу вказується, який базис представляє базисний вектор. Через крапку вказується символ, який показує вісь (абсцис x , ординат y або аплікат z), на яку взято проекцію базисного вектору. Через крапку вказується останній символ, який показує, в якому базисі взято відповідну проекцію.

Орт осі аплікат визначається як векторний добуток радіус-вектора $\vec{r}$ та вектора $\hat{k}_c$ [17]:

$$\hat{k}_c = \{k_{c.x.m}, k_{c.y.m}, k_{c.z.m}\}_M = \frac{\vec{r} \times \hat{i}_c}{|\vec{r} \times \hat{i}_c|}.$$

Орт осі ординат $\hat{j}_c$ утворює з $\hat{i}_c$ та $\hat{k}_c$ праву трійку векторів:

$$\hat{j}_c = \{j_{c.x.m}, j_{c.y.m}, j_{c.z.m}\}_M = \frac{\hat{k}_c \times \hat{i}_c}{|\hat{k}_c \times \hat{i}_c|}.$$

Матриця зв'язку між КСК та ПСК визначається наступним чином:

$$K_{CM}^T = \begin{bmatrix} i_{c.x.m} & i_{c.y.m} & i_{c.z.m} \\ j_{c.x.m} & j_{c.y.m} & j_{c.z.m} \\ k_{c.x.m} & k_{c.y.m} & k_{c.z.m} \end{bmatrix}.$$

Кути Ейлера БПА дають змогу визначити координати в ПСК базисного вектора $\hat{j}_a$ на основі відповідної матриці зв'язку [17]:

$$\begin{aligned} \hat{j}_a &= \{0, 1, 0\}_A = \{j_{a.x.m}, j_{a.y.m}, j_{a.z.m}\}_M; \\ [j_{a.x.m} \quad j_{a.y.m} \quad j_{a.z.m}]^T &= K_{AM} [0 \quad 1 \quad 0]^T; \\ K_{AM} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \theta - (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \sin \varphi \cos \theta)) & (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \sin \varphi \cos \theta) \\ \sin \psi & \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta \\ -\sin \varphi \cos \psi & (\sin \varphi \sin \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta) & (\cos \varphi \cos \theta - \sin \varphi \sin \psi \sin \theta) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Далі знайдемо координати базисного вектора $\hat{j}_a$ в базисі КСК:

$$[j_{a.x.c} \quad j_{a.y.c} \quad j_{a.z.c}]^T = K_{CM}^T [j_{a.x.m} \quad j_{a.y.m} \quad j_{a.z.m}]^T.$$

Вектор $\vec{j}'_a$ формується на основі координат орта $\hat{j}_a$ в КСК:

$$\vec{j}'_a = \{0, j_{a.y.c}, j_{a.z.c}\}_C.$$

Кут псевдокрену визначимо із застосуванням функції $f_{polar}(\cdot)$:

$$\theta' = f_{polar}(j_{a.y.c}, j_{a.z.c}).$$

Для керування абсолютним значенням $\vec{F}_p$ введено кут псевдодиферента ψ' . Він утворюється між віссю $O_a x_a$ ЗСК та вектором $\vec{i}'_m$ (рис. 3, б). Вектор $\vec{i}'_m$ представляє собою проекцію базисного вектора $\hat{i}_m$ на площину $x_a O_a y_a$ ЗСК:

$$\vec{i}'_m = \{i_{m,x}, i_{m,y}, 0\}_A;$$

$$\begin{bmatrix} i_{m,x} & i_{m,y} & i_{m,z} \end{bmatrix}^T = K_{AM}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

де $i_{m,x}, i_{m,y}, i_{m,z}$ – координати базисного вектора $\hat{i}_m$ в ЗСК; K_{AM} – матриця зв'язку між ЗСК та ПСК.

Кут псевдодиферента ψ' знайдемо за допомогою функції $f_{polar}(\cdot)$:

$$\psi' = -f_{polar}(i_{m,x}, i_{m,y}).$$

При малих β знак мінус дає від'ємні значення ψ' при диференті на ніс, та додатні значення при диференті на корму, таким чином, знаки ψ' та ψ співпадатимуть. Це дасть змогу не вносити зміни в регулятор обертового руху.

Регулятор поступального руху складатиметься з β -регулятора та ρ -регулятора, призначених для керування полярними поступальними координатами БПА відповідно β та ρ в площині $O_m y_m z_m$ ПСК. Також до його складу входить блок формування координат, який виконує перетворення заданих $\{y_g, z_g\}$ та фактичних $\{y, z\}$ декартових координат БПА в задані $\{\beta_g, \rho_g\}$ та фактичні $\{\beta, \rho\}$ полярні координати (рис. 4).

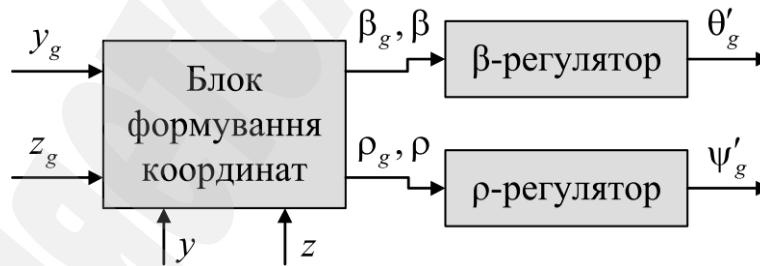


Рис. 4. Узагальнена структура регулятора поступального руху буксируваного підводного апарату

Закон керування (1) візьмемо за основу для синтезу β - та ρ -регуляторів. Узгодимо роботу β - та ρ -регуляторів наступним чином. Оскільки псевдодиферент ψ' дає змогу керувати абсолютним значенням керуючого вектора $\vec{F}_p$, то похибку за параметром ρ будемо усувати після того, як похибку за параметром β буде зменшено до деякого невеликого значення:

$$\rho_g = \begin{cases} L, & \text{при } |\beta_g - \beta| \leq \varepsilon_\beta, L = \text{const}; \\ \sqrt{y_g^2 + z_g^2}, & \text{інакше,} \end{cases}$$

де L – довжина кабель-буксира; ε_β – значення похибки за параметром β , при якому ρ -регулятор починає відпрацьовувати похибку за ρ .

Значення $\rho=L$ є недосяжним для БПА, тому абсолютне значення $\vec{F}_p$ буде триматись максимальним, поки усуватиметься похибка за параметром β . У зв'язку з цим контур керування параметром β має вищий пріоритет, ніж контур керування параметром ρ .

Постійну часу еталонної моделі для регуляторів обертових рухів було обрано 0,5 с. Постійну часу для регуляторів поступального руху оберемо в декілька разів більшою за постійну часу еталонної моделі регуляторів обертових рухів. Параметр h обирається так, щоб контур керуючої функції представляв собою аперіодичну ланку другого порядку [20]. Параметр k (та решту параметрів системи) підберемо, застосовуючи імітаційне моделювання динаміки поступального руху БПА. Обрані параметри регуляторів зведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри регуляторів системи автоматичного керування просторовим рухом буксированого підводного апарату

Параметр	β -регулятор	ρ -регулятор	θ' -регулятор	ψ' -регулятор
T_r , с	3	3,5	0,5	0,5
c	5	5	5	5
k	2,08, град./м	3,06, град./м	1, град. ⁻¹	2, град. ⁻¹
h , с ⁻¹	3,33	2,86	20	20
σ	1	-1	1	1
K_s	1,01	1,01	1,06	1,06
ε_β , град.	10		–	
κ , град.	90	45	–	

Всі регулятори системи працюють на основі закону керування (1), який обчислює керуючий вплив $u \in [-1, 1]$. Виходи β - та ρ -регуляторів обчислюються наступним чином:

$$\theta'_g = u_\beta \kappa_\beta; \quad \psi'_g = u_\rho \kappa_\rho,$$

де u_β , u_ρ – параметри, які обчислюються у відповідно β - та ρ -регуляторах на основі закону (1); κ_β , κ_ρ – коефіцієнти пропорційності для, відповідно, β - та ρ -регуляторів, їх чисельні значення наведено в табл. 1.

Обрані параметри регуляторів (табл. 1) дають високу динамічну точність керування при синусоїдальній формі задачі керування та невелике перерегулювання при ступінчастій зміні задачі керування в умовах невизначеності.

6. Результати дослідження

В рамках роботи було проведено дослідження синтезованої САК методом імітаційного моделювання в умовах невизначеності із застосуванням спеціалізованого моделюючого комплексу [6]. На рис. 5 наведені перехідні процеси при швидкості буксирування 1 м/с та ступінчастій зміні задачі керування.

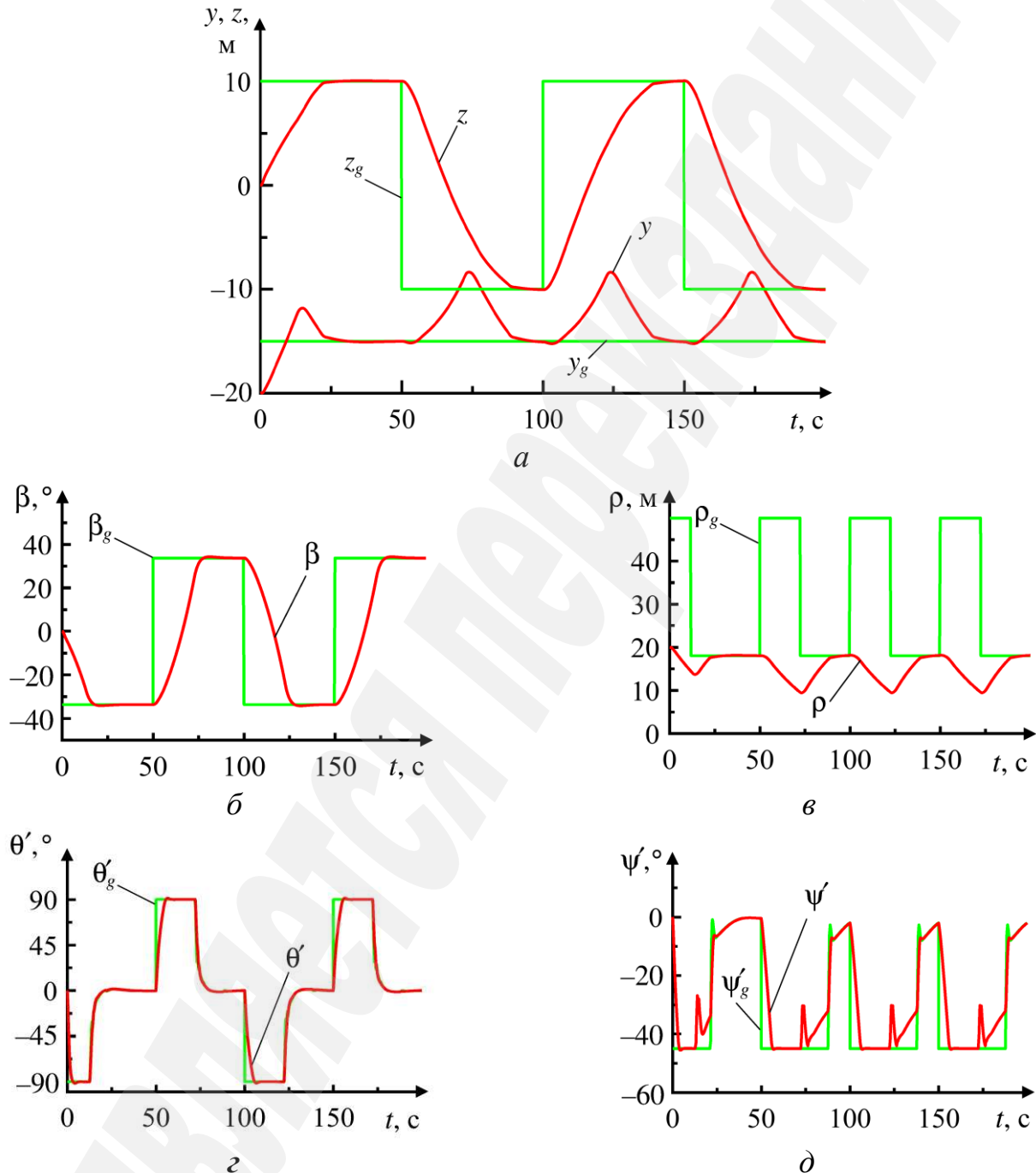


Рис. 5. Результати моделювання системи автоматичного керування просторовим рухом буксированого підводного апарату (БПА) при ступінчастій зміні задачі керування: *a* – поступальні декартові координати БПА; *б* – полярна координата β ; *в* – полярна координата ρ ; *г* – псевдокрен БПА; *д* – псевдодиферент БПА

Як бачимо на рис. 5, синтезована САК просторовим рухом БПА забезпечує усунення похибки керування та утримання БПА в заданій точці в умовах

невизначеності. При переході між заданими поступальними координатами глибина БПА зменшується і в першу чергу усувається похибка за боковою координатою z (рис. 5, *а*), оскільки полярна координата β (рис. 5, *б*) має вищий пріоритет за полярну координату ρ (рис. 5, *в*). Система автоматичного керування обертотом рухом БПА забезпечує відпрацювання заданих значень псевдокрену θ' та псевдодиферента ψ' (рис. 5, *г*, *д*).

Дослідимо просторовий рух БПА при гармонічній зміні задачі керування та швидкості буксирування 3 м/с (рис. 6).

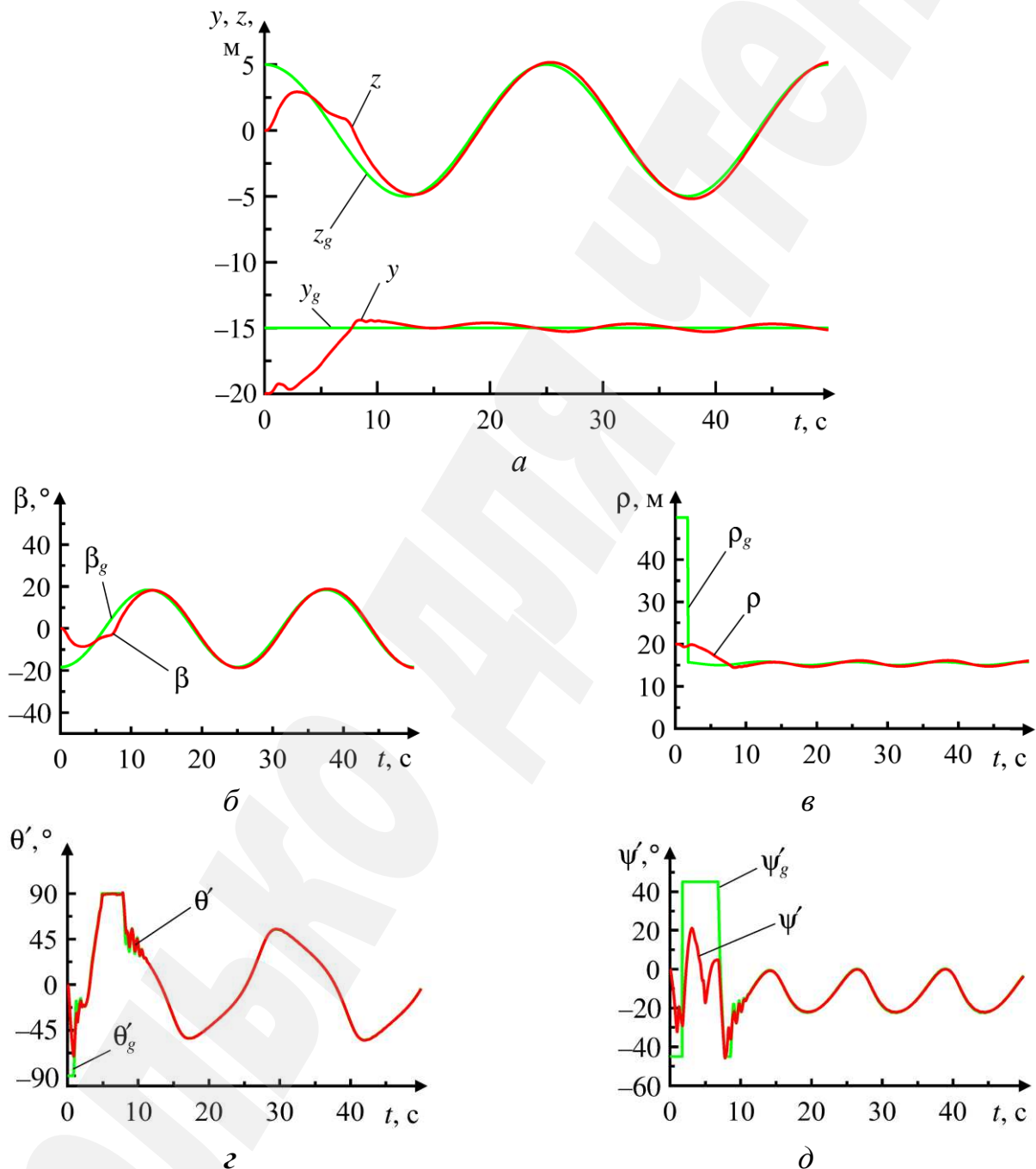


Рис. 6. Результати моделювання системи автоматичного керування просторовим рухом буксированого підводного апарату (БПА) при гармонічній зміні задачі керування: *а* – поступальні декартові координати БПА; *б* – полярна координата β ; *в* – полярна координата ρ ; *г* – псевдокрен БПА; *д* – псевдодиферент БПА

При гармонічній зміні задачі керування САК забезпечує високу динамічну точність керування, якщо не потрапляє в зону насичення (рис. 6, а). Коли з'являється похибка керування, наприклад, після потрапляння в зону насичення, то САК усуває її. Спостерігаються невеликі відхилення (до 0,3 м) координати y від її заданого константного значення, обумовлені тим, що зміна бокової координати z спричиняє виникнення збурень за вертикальною координатою y .

Полярні координати БПА представлені на рис. 6, б, в. Виходи β - та ρ -регуляторів, а також фактичні значення псевдокрену та псевдодиферента представлені на рис. 6, г, д і дають змогу оцінити, чи знаходиться САК в зоні насичення в певні моменти часу.

Динаміку роботи САК просторовим рухом БПА було досліджено при різних швидкостях буксирування в діапазоні від 1 м/с до 3 м/с. Перерегулювання не перевищувало 0,8 м, тривалість перехідних процесів від моменту виходу із зони насичення до моменту потрапляння похибки керування в діапазон $\pm 0,5$ м не перевищувала 6 с, що відповідає поставленій задачі керування в умовах невизначеності. Синтезована САК забезпечує цілком достатню динамічну точність керування БПА.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Синтезована САК працює в умовах невизначеності та забезпечує достатню динамічну точність керування. На відміну від відомих САК підводними апаратами для її синтезу не потрібна інформація про структуру та параметри математичною моделі об'єкта керування. У складі САК використано закон керування, який не потребує інформації про похідні керованої величини. Це дало змогу спростити контури зворотних зв'язків та підвищити якість синтезованої САК у порівнянні з САК, які використовують всі координати фазового простору об'єкта керування. При цьому ефект високоамплітудного перемикання керуючих впливів в синтезованій САК може спостерігатись лише в деяких випадках в режимі насичення, на відміну від САК, які працюють в режимі ковзання.

Weaknesses. В роботі синтезованої САК спостерігається невелике перерегулювання після виходу з зони насичення. Також вона не оптимальна за тривалістю перехідних процесів. А зменшення постійних часу еталонних моделей може призвести до збільшення перерегулювання.

Opportunities. Перспектива подальших досліджень вбачається в усуненні перерегулювання та в узгодженні САК БПА та СБ з метою керованого руху зі стабілізацією висоти БПА над ґрунтом.

Впровадження синтезованої САК БПА в штатне обладнання БПС дасть змогу суттєво знизити навантаження на операторів БПС та є основою для проведення довготривалих підводних місій.

Threats. Теорія автоматичного керування нелінійними об'єктами продовжує розвиватись. Застосування інтелектуальних технологій керування в умовах невизначеності в перспективі може замінити синтезовану САК. Проте для цього потребується не тільки розвиток інтелектуальних технологій керування, а і доступність обчислювальних ресурсів для їх реалізації.

Для впровадження синтезованої САК достатнім буде застосування типових обчислювальних ресурсів, які у змозі чисельними методами розв'язувати системи диференціальних рівнянь.

8. Висновки

1. Синтезовано регулятори поступальних та обертових керованих параметрів буксируваного підводного апарату, поданих в полярній системі координат. Синтез здійснено на основі закону керування з мінімізацією локальних функціоналів та коригуванням початкових умов. Отримані регулятори представляють собою основу для синтезу системи автоматичного керування просторовим рухом буксируваного підводного апарату.

2. Синтезовано систему автоматичного керування просторовим рухом буксируваного підводного апарату на основі розробленого блоку формування координат, регуляторів поступального та обертового рухів. Вона забезпечує керування за вертикальною та боковою координатами буксируваного підводного апарату без застосування похідних керованих величин в умовах невизначеності з достатньою динамічною точністю.

3. Досліджено роботу синтезованої системи автоматичного керування поступальним рухом буксируваного підводного апарату методом комп'ютерного моделювання в умовах невизначеності при швидкостях буксирування від 1 м/с до 3 м/с. Перерегулювання не перевищувало 0,8 м, тривалість перехідних процесів поза зоною насичення не перевищувала 6 с. Результати моделювання показали цілком задовільну динамічну точність слідування керованих параметрів за заданими після усунення похибки керування.

Література

1. Егоров В. И. Подводные буксируемые системы: учеб. пособие. Ленинград: Судостроение, 1981. 304 с.
2. Иконников И. Б., Гаврилов В. М., Пузырев Г. В. Подводные буксируемые системы и буи нейтральной плавучести. Санкт-Петербург: Судостроение, 1993. 224 с.
3. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. Norway: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 596 p. doi: <http://doi.org/10.1002/9781119994138>
4. Динамика подводных буксируемых систем / Поддубный В. И., Шамарин Ю. Е., Черненко Д. А., Астахов Л. С. Санкт-Петербург: Судостроение, 1995. 200 с.
5. Dudykevych V., Blintsov O. Tasks statement for modern automatic control theory of underwater complexes with flexible tethers // Eureka: Physics and Engineering. 2016. Issue 5. P. 25–36. doi: <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00158>
6. Blintsov O. V., Sokolov V. V. Specialized simulating complex for studying motion dynamics of the towed underwater system // Collection of Scientific Publications NUS. 2017. Vol. 3. P. 63–69. doi: <http://doi.org/10.15589/jnn20170308>
7. Minowa A., Toda M. A High-Gain Observer-Based Approach to Robust Motion Control of Towed Underwater Vehicles // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2018. P. 1–14. doi: <http://doi.org/10.1109/joe.2018.2859458>

8. Robust automatic control system of vessel descent-rise device for plant with distributed parameters «cable – towed underwater vehicle» / Chupina K. V. et. al. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015. P. 032167. doi: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032167>

9. Heading control of ROV ROSUB6000 using non-linear model-aided PD approach / Ramesh R. et. al. // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2013. Vol. 3, Issue 4. P. 382–393.

10. Soltan R. A., Ashrafiuon H., Muske K. R. ODE-based obstacle avoidance and trajectory planning for unmanned surface vessels // Robotica. 2010. Vol. 29, Issue 5. P. 691–703. doi: <http://doi.org/10.1017/s0263574710000585>

11. Modelling, Design and Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle / Garcia-Valdovinos L. G. et. al. // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2014. Vol. 11, Issue 1. P. 1–16. doi: <http://doi.org/10.5772/56810>

12. Bessa W. M., Dutra M. S., Kreuzer E. Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller // Robotics and Autonomous Systems. 2008. Vol. 56, Issue 8. P. 670–677. doi: <http://doi.org/10.1016/j.robot.2007.11.004>

13. Bessa W. M., Dutra M. S., Kreuzer E. Dynamic positioning of underwater robotic vehicles with thruster dynamics compensation // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10, Issue 9. P. 325. doi: <http://doi.org/10.5772/56601>

14. Дык Ч. Т. Экспериментальное исследование системы управления высотой хода подводного буксируемого аппарата // Технологический аудит и резервы производства. 2013. № 5/5 (13). С. 29–31. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.18381>

15. Надточій В. А. Інтеграція керування самохідною прив'язною підводною системою з складі морського технологічного комплексу // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2013. № 5/4 (65). С. 40–45. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18342>

16. Output feedback motion control system for observation class ROVs based on a high-gain state observer: theoretical and experimental results / Fernandes D. A. et. al. // Control Engineering Practice. 2015. Vol. 39. P. 90–102. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.12.005>

17. Блінцов О. В. Системи автоматичного керування рухом підводних комплексів з гнучкими зв'язками: навчальний посібник. Миколаїв: Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2018. 251 с.

18. Blintsov O. Formation of a reference model for the method of inverse dynamics in the tasks of control of underwater complexes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 4, Issue 2 (82). P. 42–50. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.74875>

19. Лукомский Ю. А., Пешехонов В. Г., Скороходов Д. А. Навигация и управление движением судов: учебник. Элмор, 2002. 360 с.

20. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. Цикл лекций: уч. пос. Москва: Машиностроение, 2004. 576 с.

21. Блінцов О. В., Соколов В. В., Корицький В. І. Автоматичне керування безекіпажним підводним комплексом системи моніторингу акваторії в умовах невизначеності // Сучасні проблеми інформаційної безпеки на транспорті: матер. VIII Всеукр. наук.-техн. конф. з міжн. участю. 2018. С. 19–26.