

В. С. Блінцов¹, професор, Г. С. Грудініна², викладач

ОСОБЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ СТАБІЛІЗОВАНИМ РУХОМ АВТОНОМНИМ НЕНАСЕЛЕНИМ ПІДВОДНИМ АППАРАТОМ В УМОВАХ ДІЇ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ

En

The perfection of the mathematical model of AUV motion in the horizontal plane is presented. In order to study the change in the hydrodynamic characteristics of AUV, a simulation of its motion in the MATLAB Simulink system was performed. The analysis of the basic typical modes of movement of the AUV has revealed that during the execution of the mission, the propulsion and steering complex of the apparatus functions in a beveled stream of water flowing. During the research, it was found that the propeller stroke has a nonlinear dependence on the angle of flow of water, as well as on the speed of the AUV. The developed mathematical model gives the opportunity to specify the necessary parameters for the development of high-quality automatic control systems AUV.

Ru

Представлено усовершенствование математической модели движения автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) в горизонтальной плоскости. С целью исследования изменения гидродинамических характеристик АНПА проведено моделирование его движения в системе Simulink среды MATLAB. Проведенный анализ основных типовых режимов движения АНПА обнаружил, что во время выполнения миссии движительно-рулевой комплекс аппарата функционирует в скошенном потоке воды. Во время исследований установлено, что сила упора гребного винта имеет нелинейную зависимость от угла потока воды, а также от скорости движения АНПА. Разработанная математическая модель дает возможность уточнить необходимые параметры для разработки высококачественных систем автоматического управления АНПА.

Вступ

Розширення задач дослідження підводного простору вимагає застосування АНПА із високими показниками точності керованого руху і, особливо, стабілізації параметрів цього руху, як прямолінійного так і криволінійного. Для вирішення широкого спектру підводних задач АНПА, як агент застосовує різні типи підводного руху, такі як: програмне наведення на об'єкт, маршовий рух, ділянка наведення з огибом можливих перешкод, ділянка гальмування та зависання над об'єктом. Тому необхідно враховувати постійну дію зовнішнього збурення, яка впливає на точність заданого

¹ Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

² Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

руху АНПА. Також особливу увагу необхідно приділяти саме задачі стабілізації траєкторного руху АНПА.

Розв'язання цієї задачі можливо шляхом створення сучасних систем автоматичного керування прямолінійним і просторовим рухом АНПА, які мають відповідні технічні та програмні засоби для вимірювання реальних параметрів руху і оперативного високоточного реагування на дію зовнішніх збурень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз сучасних вітчизняних і зарубіжних наукових публікацій свідчить, що високоточне керування АНПА можливе за умов достовірного математичного моделювання основного виконавчого механізму керування, а саме, рушійно-стернового комплексу, який включає для типових апаратів гвинт у насадці і горизонтальне або вертикальне стерно.

Проведений аналіз показує, що на сьогодні актуальним є питання урахування нелінійних особливостей роботи рушійного-стернового комплексу в умовах косоного набігаючого потоку, так, як саме цей режим можна вважати головним маневреним режимом роботи АНПА [1, 2–4].

Під час стабілізації руху АНПА на заданій траєкторії необхідно дуже швидко реагувати на будь-яке відхилення АНПА від траєкторії – від цього залежить похибка керування та коректність виконання заданої місії.

Тому, якщо апарат рухається по прямолінійній траєкторії, він перебуває під дією зовнішнього впливу або, якщо виконує огиб перешкоди, його рушійно-стерновий комплекс знаходиться в умовах косоного потоку [5–8, 9].

Автори [8, 9] звертають увагу на різні типи траєкторій руху АНПА, під час виконання різних місій. Виділяють наступні типові режими траєкторного руху АНПА: по прямій – зі стабілізацією на курсі, глибині, висоті над ґрунтом; галсами – трикутними, прямокутними; по плоскій кривій – по спіралі, по кусково-ламаній траєкторії, рух по кривій з контролем відстані; стабілізація висоти – вздовж горизонтальних конструкцій; стабілізація зміщення – вздовж вертикальних конструкцій тощо [10].

Одним із найпоширеніших засобів математичного моделювання є пакет прикладних програм *MATLAB*. У даній системі передбачені достатньо прості засоби, що дозволяють вирішувати завдання об'єктно-орієнтованого програмування [11]. Набір продуктів *MATLAB* і *Simulink* дозволяють створити модель практично будь-якої системи. Саме завдяки цим перевагам багато авторів використовують пакети прикладних програм *MATLAB*.

Постановка задачі

Мета дослідження – сформулювати основні задачі і режими стабілізованого руху АНПА в умовах зовнішнього збурення. Розробити математичну модель руху АНПА у горизонтальній площині та визначити основні характеристики апарата, як суттєво нелінійного об'єкта керування під час траєкторного стабілізованого руху.

Викладення основного матеріалу

Рушійно-стерновий комплекс (РСК) є основним джерелом сил, що призводить до прямолінійного або криволінійного руху АНПА під час маневрування. Він складається із рушія (гребного гвинта, гребного гвинта у насадці тощо) і засобів керування (керма, поворотної насадки, заслінок тощо). Головне призначення рушія у складі РСК – створення поздовжньої рушійної сили. Головне призначення засобів керування – створення поперечної сили, що забезпечує керування АНПА під час маневрування [3, 8].

Розподіл функцій між рушієм і засобами керування існує умовно. На рушії створюється не тільки поздовжня сила, а й поперечна, а на засобах керування поряд із поперечною силою виникає і поздовжня. У результаті цього дія РСК у більшості випадків функціонально неподільна.

Дія РСК неподільна також із точки зору гідродинаміки внаслідок взаємного впливу, що утворюють його елементи.

Робота засобів керування безпосередньо пов'язана із впливом струменя рушія і залежить від його параметрів.

У свою чергу, засоби керування мають зворотний вплив на роботу рушія. Таким чином, РСК повинен розглядатися, як комплекс, призначений для створення сили, вектор якої може довільно змінюватися за величиною і за напрямом.

Під час руху АНПА досить часто працює у режимі, коли напрямок набігаючого потоку має деякий кут з віссю рушія. Тому виникає задача виявлення впливу косоного потоку на номінальні параметри рушійного комплексу.

Для розробки системи керування АНПА із рушійним комплексом у насадці та стерном розглянемо аналітичне рішення задачі впливу зміни кута та швидкості набігаючого потоку на гідродинамічні характеристики рушія.

Силу упору гребного гвинта можна визначити наступним чином [2]:

$$\bar{P} = -Q_m ((\bar{V}_{\text{АНПА}} + \bar{\omega}_\alpha) - \bar{V}_{\text{АНПА}}),$$

де Q_m – масовий протік води крізь перетин рушія;

$V_{\text{АНПА}}$ – швидкість набігання води на рушій (дорівнює швидкості АНПА); ω_α – співвісна швидкість на виході із рушія.

Розділ 3. Керування

Позначимо площу перерізу рушія через F_p , а швидкість води у перерізі – V_s , тоді:

$$\bar{P} = -F_p V_s \rho ((\bar{V}_{\text{АНПА}} + \bar{\omega}_\alpha) - \bar{V}_{\text{АНПА}}).$$

Якщо вважати, що у разі виходу із насадки маємо повну співвісну швидкість, тоді можна записати $V_s = V_{\text{АНПА}} + \omega_\alpha$.

Позначивши, $\bar{\omega} = \frac{\omega_\alpha}{V_{\text{АНПА}}}$ отримаємо вираз для проекції сили упору на вісі у системі координат, що пов'язана із рушієм, рис. 1:

$$P_x = \rho F_p V_{\text{АНПА}}^2 (1 + \bar{\omega})(1 + \bar{\omega} - \cos \alpha),$$

$$P_y = \rho F_p V_{\text{АНПА}}^2 (1 + \bar{\omega}) \sin \alpha.$$

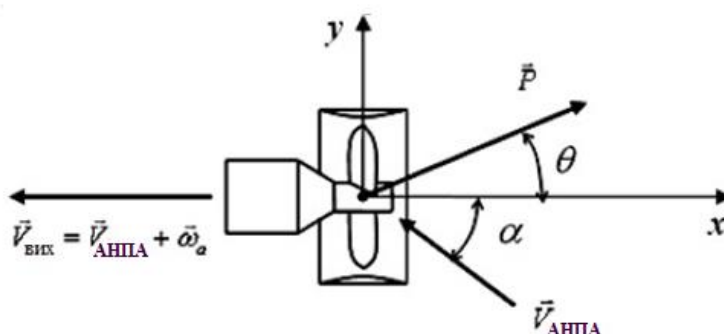


Рис. 1. Рухома система координат

Виразимо силу упору рушія P_0 під час роботи у співвісному потоці ($\alpha = 0$), $P_0 = \rho F_p V_{\text{АНПА}}^2 (1 + \bar{\omega})\bar{\omega}$. Тоді вираз для проекції сили упору можна записати у вигляді:

$$P_x = \frac{P_0}{\bar{\omega}} (1 + \bar{\omega} - \cos \alpha),$$

$$P_y = \frac{P_0}{\bar{\omega}} \sin \alpha.$$

Використаємо відомий коефіцієнт навантаження рушія по упору:

$$\sigma_T = \frac{2P_0}{\rho F_p V_{\text{АНПА}}^2} = 2\bar{\omega}(1 + \bar{\omega}).$$

Виразивши із цього рівняння $\bar{\omega}$, отримаємо кінцеві формули для розрахунку проекцій сили упору під час роботи рушія у косому потоці води [2, 12]:

$$P_x(\sigma_T, \alpha) = P_0 \frac{1 + \sqrt{1 + 2\sigma_T} - 2 \cos \alpha}{\sqrt{1 + 2\sigma_T} - 1},$$

$$P_y(\sigma_T, \alpha) = P_0 \frac{2 \sin \alpha}{\sqrt{1 + 2\sigma_T} - 1}.$$

Відомо, що рушійною реактивною силою, яка діє на працюючий рушійно-стерновий комплекс, є так звана результуюча сила R , що утворюється у результаті складного характеру обтікання гребного гвинта і насадки.

Під час розробки системи керування АНПА для досягнення точності стабілізованого руху необхідно безперервно компенсувати дію зовнішнього збурення на апарат. Тому досить зручно було б знати залежність кута напрямку дії результуючої сили від кута набігаючого потоку. Також залежність сили упору рушія від швидкості косоного потоку, рис. 2 [9, 21].

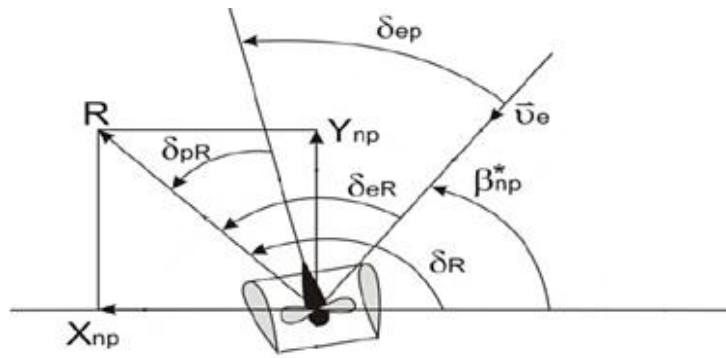


Рис. 2. Відхилення вектора результуючої сили у косому потоці

На рис. 2 представлено:

- δ_R – кут відхилення вектора результуючої сили від осі $O_{np} X_{np}$ координатної системи $O_{np} X_{np} Y_{np}$ (рухома, прямокутна права координатна система, пов'язана із судном, початок координатної системи O_{np} збігається із точкою розташування РСК);
- δ_{ep} – кут між вектором швидкості набігаючого потоку \vec{u}_e і віссю гребного гвинта, позитивний напрямок якої збігається з напрямком вектора результуючої сили;
- δ_{eR} – кут між векторами швидкості набігаючого потоку і результуючої сили;
- δ_{pR} – кут між віссю гребного гвинта і вектором результуючої сили, позитивний напрямок відліку кутів δ_{ep} , δ_{eR} , δ_{pR} – проти годинникової стрілки.

Значення результуючої сили, що діє на РСК, у математичній моделі об'єкта керування розраховується за методом, запропонованим А. Д. Гофманом (1988) із використанням результатів модельного експерименту, виконаного у Дуйсбурзькому дослідному басейні [1, 3].

Розділ 3. Керування

Попереднє математичне моделювання залежності відношення результуючої сили до упору поворотно-гвинтової колонки

На підставі методики, запропонованої А. Д. Гофманом, залежність відношення результуючої сили до упору поворотно-гвинтової колонки (ПГК) T_{np}^0 під час осьовому набіганні потоку ($\delta_{ep} = 0$) – це відношення $t_R = R/T_{np}^0$ від значення реального кута δ_{ep} і коефіцієнта навантаження ПГК по упору σ_{np}^0 в осьовому потоці і разі швидкості натікання v'_e , виходячи із умови $\beta_{np}^* = \delta_{np}$ (δ_{np} – кут перекладки ПГК, β_{np}^* – кут скосу потоку, набігаючого на ПГК, рис. 3) і частоті обертання гребного гвинта n .

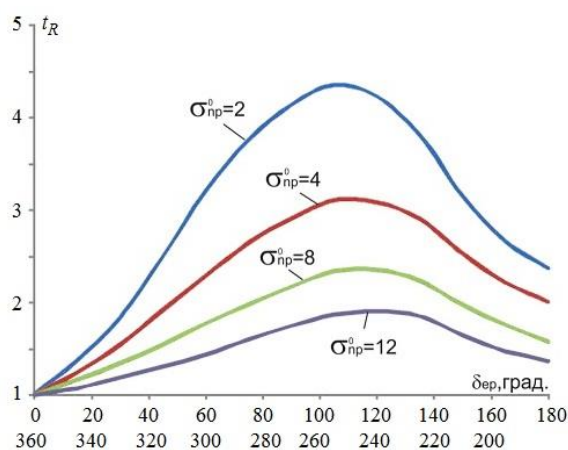


Рис. 3. Залежність коефіцієнта t_R від кута набігання потоку δ_{ep} і коефіцієнта навантаження по упору у разі осьового набігання потоку на ПГК σ_{np}^0

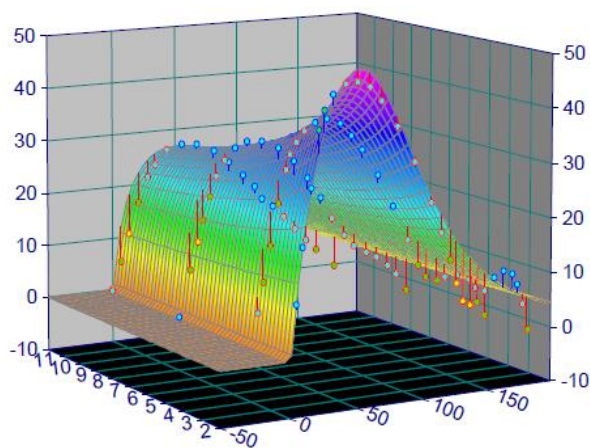


Рис. 4. Кут відхилення результуючої сили ПГК від осі гребного гвинта $\delta_{pR}(\delta_{ep}, \sigma_{np}^0)$

Залежності $t_R(\delta_{ep}, \sigma_{np}^0)$, $\delta_{pR}(\delta_{ep}, \sigma_{np}^0)$ для випробуваної серії гребних гвинтів В4-55, що працюють у насадці, у графічному форматі

наведені на рис. 3 і рис. 4 (значення кута δ_{ep} у діапазоні $180^\circ \leq \delta_{ep} \leq 360^\circ$ (рис. 3) повинні прийматися негативними).

Стабілізація на траєкторії, як типовий режим руху АНПА

Типовий цикл роботи АНПА містить наступні етапи: занурення в початкову точку місії, виконання підводної місії й повернення до бази. Перший етап виконується шляхом руху АНПА із поверхні моря в початкову точку роботи по найкоротшій прямій або по спіралі.

Другий етап має низку модифікацій і залежить від завдання місії: прямолінійний рух зі стабілізацією курсу, траєкторії, глибини або висоти над ґрунтом; рух по криволінійних траєкторіях; автоматичний обхід перешкод; позиціонування у точці; періодичне спливання на поверхню для сеансів зв'язку із базою.

Третій етап виконується шляхом спливання АНПА на поверхню по прямій або по спіралі із наступним поверненням на судно-носії.

Зміст типової місії АНПА: вимір гідрофізичних і гідрохімічних параметрів середовища, гідроакустичне обстеження водних акваторій, фото- і відеозйомка донної поверхні й підводних об'єктів, доставка корисного вантажу, постановка гідроакустичних перешкод.

У ролі сенсорів просторового руху на АНПА застосовуються: системи магнітного і гіроскопічного вказування курсу; сенсори глибини гідроакустичного і гідростатичного типу; сенсори крену і диференту; сенсори швидкості руху (абсолютні й відносні); відеосистеми реального часу; акселерометри тощо.

Можна відзначити наступні типові режими просторового (траєкторного) руху АНПА, що визначають вимоги до їх систем автоматичного керування (рис. 5): по прямій – зі стабілізацією на курсі, глибині, висоті над ґрунтом; галсами – трикутними, прямокутними; по плоскій кривій – по спіралі, по кусково-ламаний траєкторії; рух по кривій з контролем відстані; стабілізація висоти між підводним об'єктом та на траєкторії; вздовж вертикальних конструкцій; рух уздовж опор морських стаціонарних платформ; траєкторний багатократний рух між поверхнею моря та заданою точкою морського дна; складний просторовий рух у стиснених навігаційних умовах [5, 21]. У даній роботі розглядається тільки траєкторний рух у горизонтальній площині (стабілізований по глибині) (рис. 5, б, рис. 5, в, рис. 5, г).

Варіацією програмних параметрів можна сформувати все різноманіття траєкторій, складених із сполучених прямолінійних, кругових і хвильових типових елементів. На етапі планування траєкторії АНПА використовуються такі типові елементи покриття районів: меандр, зігзаг, циклоїда, спіраль. Розглянемо докладніше ці фігури руху.

Розділ 3. Керування

Райони великої площі обстежуються, як правило, за допомогою ГБО. Рух АНПА у цьому випадку задається як послідовність паралельних взаємообернених галсів, що нагадують прямокутний меандр (рис. 5, б). Меандр забезпечує найбільш ефективно покриття великих територій, оскільки не містить повторних покриттів і зворотних рухів.

У разі завдання орієнтації фігури на місцевості враховуються 2 фактора: переважний напрямок течії і кількість поворотів АНПА. Для мінімізації кількості поворотів робочі галси (у межах яких відбувається робота пошукових засобів) орієнтуються уздовж найдовшої сторони району. По можливості вся фігура розгортається так, щоб дані галси були орієнтовані вздовж течії [4, 20].

Коли необхідно провести пошук і наступну інспекцію підводної комунікації із використанням бортових засобів виявлення (ГБО, ЕМВ, фотосистеми), застосовується зигзагоподібна фігура, що нагадує змійку.

Галси розташовуються під кутом 45° до напрямку об'єкта обстеження (кабелю), тому що це забезпечує найкращі умови для роботи ЕМВ і максимальну площу фігури (відповідно ймовірність виявлення об'єкта).

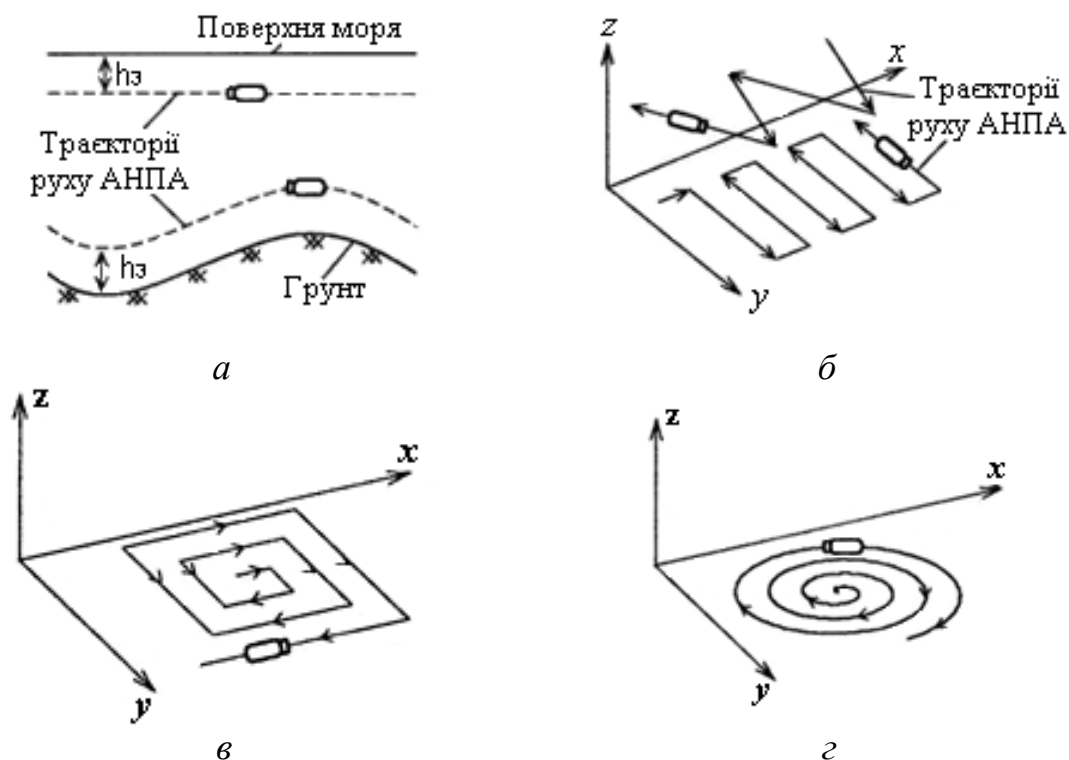


Рис. 5. Типові траєкторії стабілізованого руху

Траєкторія руху у формі циклоїди використовується для огляду точкових об'єктів (тобто об'єктів, розміри яких порівнянні із розмірами АНПА і його радіусом циркуляції).

Найчастіше координати таких об'єктів виявляються у ході місцевих зйомок, тому наявність попередньої інформації дозволяє говорити про повторне і більш детальне дослідження. Огляд здійснюється, як правило, із

використанням відеореєстраторів (фото або відеокамери), тому висота руху АНПА над ґрунтом відносно невелика (2 – 4 м). Типова місія полягає у паралельних галсах, розташованих одне від одного не далі ніж 2 – 4 метри, для забезпечення покриття кадрів.

Ділянку більшого розміру набагато ефективніше покривати східною прямокутною спіраллю Архімеда. У той момент, коли одна із довжин галсів зменшується до 80 м, слід переходити до циклоїди, оскільки на крейсерській швидкості АНПА не зможе належним чином вписуватися у повороти малої спіралі. Спіраль придатна для обстеження як точкових об'єктів, так і поверхневих не поступаючись меандру у ефективності. Для спіралі і циклоїди справедливі ті ж міркування щодо вибору орієнтації, що і для меандру [4].

Як бачимо із рис. 5, б і рис. 5, в, такий рух складається здебільшого із прямолінійних відрізків, за якого апарат рухається у сталому режимі із незмінною швидкістю. Для такого руху характерна сталість дії як гідродинамічних сил, так і сил ваги і підтримки. Однак, за наявності течії або у разі переходу із зони однієї течії у іншу досить часто траєкторний прямолінійний рух перетворюється на дугу, що є недопустимо під час зйомки ГБО.

Із позиції гідродинаміки за таких умов рушійно-стерновий комплекс починає працювати у косому потоці води, тому, у залежності від кута набігання потоку змінюється кут дії результуючої сили, що призводить до відхилення від траєкторії.

Коли дане відхилення досягає деякого значення система керування АНПА починає його відпрацьовувати, а потім знову переходить до прямолінійного руху. Таким чином замість прямолінійної траєкторії майже завжди маємо довільну хвилясту лінію. Швидкість відпрацювання похибки можна значно збільшити якщо закласти у систему керування поправку на відхилення куту дії результуючої сили.

Під час руху АНПА по колу із постійним радіусом та кутом атаки, як правило швидкість апарата залишається постійною. У даному випадку, у разі накладення обмежень на значення курсового кута, напрямок дії результуючої сили можна визначити як сталий коефіцієнт для функції керування, враховуючи гідродинамічні та кінематичні особливості апарата. Даний рух є окремим випадком лінійного руху.

Інша картина під час руху АНПА по спіралі (округлій, рис. 5, г). У даному випадку, навидь за постійно заданій швидкості, відбувається її зміна у наслідок постійної зміни дії гідродинамічних сил (в'язкості, тертя, інерції та обтікання корпусу апарату) у разі постійної зміни курсового кута. Під час розробки програми керування траєкторним рухом по спіралі необхідно враховувати не тільки постійну зміну кута дії результуючої сили, а і нестабільність гідродинамічних параметрів об'єкта керування.

Математична модель об'єкта керування, як основна частина системи керування АНПА

Математичне моделювання керованого руху АНПА можна представити як сукупність інформаційних, електромеханічних та гідромеханічних систем, які є складовими математичної моделі об'єкту керування, та взаємодіють між собою.

Система автоматичного керування рухом – програмне середовище, де виконується обробка інформації, яка надходить від сенсорів, та оброблюються керуючі сигнали для виконавчих механізмів АНПА:

- рушійно-стерновий комплекс – це автономно працюючий рушій (гребний гвинт у насадці), що отримує механічну енергію від відповідного електричного двигуна через валопровід та механічний редуктор;
- корпус АНПА – це тверде тіло, що рухається у воді під дією упору рушія і сприймає силу гідродинамічного опору із урахуванням приєднаних мас води у динамічних режимах; на корпус АНПА діють також сили зовнішніх збурень; корпус АНПА може змінювати свої експлуатаційні параметри під час роботи під водою – масу та характеристики обтічності (коефіцієнти гідродинамічного опору);
- зовнішні збурення – течія і хвильова дія [5].

Розглянемо математичну модель руху АНПА вздовж осі x . Тому об'єкт керування у режимі горизонтального руху розглянемо як тверде тіло (корпус АНПА), що рухається під дією упору гребного гвинта, який через редуктор приводиться у рух гребним електродвигуном (у даному випадку постійного струму незалежного збудження):

$$L \frac{di}{dt} = K_u u_x - r_\gamma i - \frac{c\Phi}{k_p} \omega$$

$$J_{\Gamma\Gamma} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{ЕД}} - Q = \frac{c\Phi}{k_p} i - \frac{K_Q \rho D^5}{4\pi^2} \omega^2 ;$$

$$(m_{\text{ПА}} + \lambda_x) \frac{dV_x}{dt} = T - F_x - F_{Dx} = \frac{K_T \rho D^4}{4\pi^2} \omega^2 - \frac{\rho C_x \Omega}{2} V_x^2 - F_{Dx},$$

де i – миттєве значення електричного струму якоря електродвигуна;

u_x, K_u – керуючий сигнал регулятора напруги та його коефіцієнт підсилення, відповідно;

L, r_γ, c, Φ – електромагнітні параметри електродвигуна;

ω – частота обертання гребного гвинта;

k_p – коефіцієнт передачі редуктора;

$J_{\Gamma\Gamma}$ – приведений до гвинта момент інерції системи «гребний електродвигун – редуктор – валопровід – гребний гвинт»;

$M_{\text{ЕД}} = c\Phi i / k_p$ – рушійний момент електродвигуна;

$Q = K_Q \rho D^5 \omega^2 / 4\pi^2$ – гальмівний момент, що створюється гребним гвинтом;

K_Q – безрозмірний нелінійний коефіцієнт, що характеризує момент гребного гвинта; ρ – питома густина води;

D – діаметр гребного гвинта; $m_{ПА}, \lambda_x$ – маса ПА та приєднана маса води;

V_x – поточна швидкість руху ПА по осі x ;

$T = K_T D^4 \omega^2 / 4\pi^2$ – рушійна сила (упор) гребного гвинта;

K_T – безрозмірний нелінійний коефіцієнт, що характеризує упор гребного гвинта;

$F_x = \rho C_x \Omega V_x^2 / 2$ – сила опору води руху ПА;

C_x – гідродинамічний коефіцієнт корпусу ПА по осі x ;

Ω – площа змоченої поверхні зовнішнього корпусу ПА;

F_{Dx} – сила зовнішнього збурення по осі x [6].

Крім того, використання коефіцієнтів K_Q і K_T обмежено лише частиною режимів. Для моделювання реверсивних режимів додатково використовуються коефіцієнти K_m і K_p , а упор і гальмівний момент гребного гвинта розраховуються за формулами:

$$Q = K_m \rho D^3 V_x^2; \quad T = K_p \rho D^2 V_x^2$$

Значення коефіцієнтів K_Q , K_T , K_m і K_p визначаються за графічними залежностями, побудованими для кожного конкретного типу гребного гвинта.

Якщо записати описану вище систему рівнянь у вигляді рекурентних різницевих залежностей, а графічні залежності для визначення коефіцієнтів K_Q , K_T , K_m і K_p апроксимувати, то отримаємо досить просту розрахункову модель, за якою можна обраховувати динаміку руху підводного апарата [7].

Проектування системи керування АНПА передбачає побудову його математичної моделі, яка адекватно передає нелінійність динаміки руху, нестационарність параметрів моделі, а також взаємодію корпусу із в'язким середовищем. Тому для урахування значної нелінійності, особливо під час роботи апарата у косому потоці необхідно більш детально розглянути потік рідини, що викликає гідродинамічні впливи, виникає у результаті підсумування власного руху і руху води (течія, хвилювання).

Моделювання сил гідродинамічного опору АНПА виконується за наступною схемою. Використовують відому формулу для гідродинамічної сили R , створеної потоком зі швидкістю v на твердому тілі [8]:

$$R = 0,5 C_p \rho \Omega v^2,$$

де C – коефіцієнт гідродинамічного опору корпусу; ρ – густина рідини; Ω – характерна площа тіла, що обтикається.

Розділ 3. Керування

У якості Ω приймають змочену поверхню легкого корпусу АНПА. Коефіцієнт опору корпусу представляють формулою:

$$C = C_F + C_{VP} + C_A + C_{AP} + C_H + C_i.$$

де $C_v = C_F + C_{VP}$ – коефіцієнт в'язкісного опору корпусу АНПА;

C_F, C_{VP} – коефіцієнти опору тертя й тиску;

C_A – коефіцієнт опору шорсткостей;

C_{AP} – коефіцієнт опору виступаючих частин;

C_H – коефіцієнт опору ніш і вирізів корпусу;

C_i – коефіцієнт імпульсного опору.

У [9, 17] зазначено, що $C = f(\Phi, Re, Sh, \varepsilon)$, де Φ – група безрозмірних геометричних параметрів; Re – число Рейнольдса; Sh – число Струхалія; $\varepsilon = \sqrt{(\Delta v)^2} / v_{cp}$ – ступінь турбулентності, причому $\sqrt{(\Delta v)^2}$ – середньоквадратичне значення пульсацій швидкості; v_{cp} – середня швидкість турбулентного потоку.

Для всіх коефіцієнтів у довідковій літературі даються рекомендації з розрахунку їхніх значень, в основному, на базі емпіричних і графічних залежностей.

Під час дослідження динаміки просторового руху підводних апаратів, у якості базової математичної моделі використовують рівняння автономного підводного апарату, який може вільно переміщатися у горизонтальній і вертикальній площині. Для аналізу цих переміщень потрібна повна модель просторового руху твердого тіла у рідкому середовищі. Однією із головних особливостей задач динаміки твердого тіла є існування рухомої осі обертання (рис. 6), [10, 19].

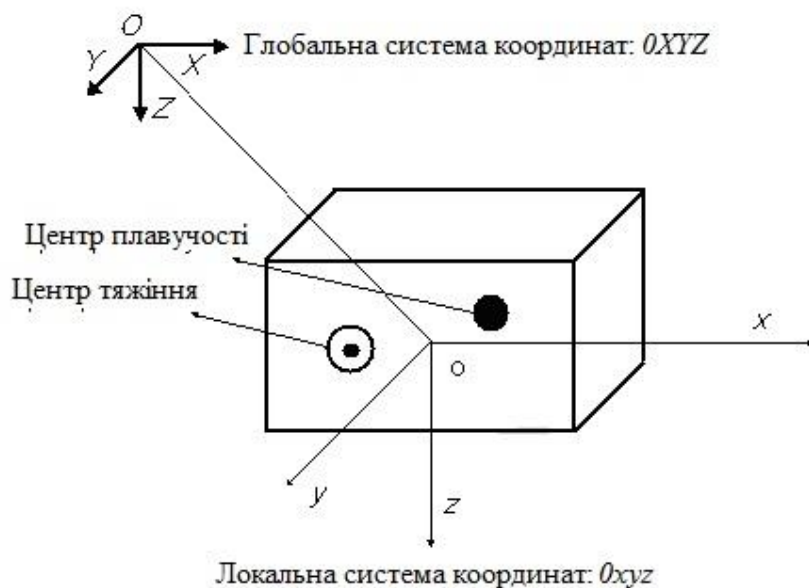


Рис. 6. Глобальна і локальна системи координат

Рух АНПА розглядається відповідно до законів механіки твердого тіла у тривимірному просторі із шістьма ступенями свободи. Три із них характеризують лінійні переміщення центра мас, інші три – обертання твердого тіла відносно центра мас. Кожній ступені свободи відповідає одна швидкісна координата, у якості якої виступає проекція вектора лінійної або кутової швидкості на відповідну вісь прийнятої координатної системи [5, 8].

Розробка узагальненої системи керування АНПА під час руху у косому потоці води, що набігає

Ефективне керування нелінійними динамічними об'єктами у сучасній техніці автоматичного керування досягається шляхом побудови адаптивних систем керування із еталонними моделями об'єктів керування та із широким застосуванням апроксиматорів нелінійних характеристик, які розширюють діапазон впливу на керований процес.

Під час руху по заданій траєкторії основною регульованою величиною η є бічне відхилення центра ваги АНПА від заданої лінії шляху. Засобами керування тому виступає рушійно-стерновий комплекс у насадці і кермо. У разі роботи апарата у косому потоці значної нелінійності набуває залежність сили упора від кута набігаючого потоку, що у свою чергу призводить до невизначеності напрямку дії результуючої сили. Отже, для покращення якості регулювання і стабілізації руху апарата у системі керування необхідно враховувати функцію зміни сили упора від кута та швидкості набігаючого потоку $T = f(v_{\Pi}, \varphi_{\Pi})$. Також необхідно враховувати нестационарність інших гідродинамічних параметрів АНПА (вага, обтічність) під час виконання заданої місії. Зрозуміло, що для вирішення поставленої задачі доведеться обробляти не один масив даних.

Штучні нейронні системи належать до ефективних засобів автоматизації. Вони дозволяють будувати високоефективні системи керування нелінійними динамічними об'єктами, оскільки дають змогу апроксимувати будь-яку функцію дійсних чисел із заданою точністю [5, 20].

Варіантом побудови системи керування нелінійним об'єктом є схема із застосуванням прямої та інверсної моделей регульованої системи, або система із внутрішньою моделлю (рис. 7).

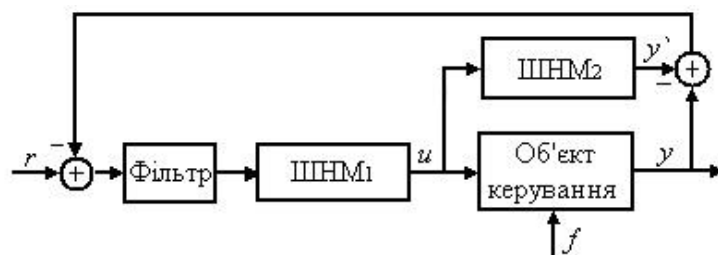


Рис. 7. Схема прямого інверсного керування

Тому пряма й інверсна моделі повністю синтезуються за допомогою відомих алгоритмів навчання нейронних мереж. Цифровий фільтр застосовується у схемі для придушення коливань, що виникають за порівняння реального значення керованої величини й відновленого прямою моделлю, яка відіграє роль спостерігача стану, однак не є ним у повному розумінні, оскільки є лише наближенням до нього, і працює в обмеженому діапазоні вхідних координат.

Згідно із принципом прямого інверсного керування інверсна модель (ШНМ₁) системи ставиться у прямий канал керування. У процесі роботи на реальну систему діє збурення f і у разі порівняння сигналів прямої моделі (ШНМ₂) y і реального значення керованої координати u отримують сигнал неузгодженості, пропорційний похибці керування. Цей сигнал є корегувальним для системи, і шляхом збільшення заданого сигналу r на пропорційну величину дозволяє позбутися статичної похибки по керуванню і збуренню.

Порівняння ефективності застосування ШНМ у системах автоматичного керування нелінійними об'єктами із іншими відомими типами систем керування показує, що вони мають наступні суттєві переваги:

- відсутність обмежень на лінійність системи;
- ефективність роботи в умовах перешкод;
- керування в реальному масштабі часу після закінчення навчання.

Нейромережеві системи керування більш гнучко настроюються на реальні умови експлуатації, утворюючи моделі, повністю адекватні поставленій задачі, і не мають обмежень, пов'язаних із побудовою формальних систем [5, 22].

Для проведення моделювання роботи розробленої системи керування доцільно застосування пакету прикладних програм *Simulink MATLAB*. Даний пакет має інструмент для синтезу та аналізу нейронних мереж – *Neural Network Toolbox* та дозволяє виконати чисельне моделювання і візуалізувати результати у вигляді графіків.

Висновки

1. Удосконалено математичну модель руху АНПА у горизонтальній площині та проведено моделювання її роботи у системі *Simulink*.
2. Проведено аналіз основних режимів роботи АНПА та встановлено, що рушійно-стерновий комплекс апарата майже постійно працює в косому потоці води, що набігає. Зміна кута та швидкості потоку води, що набігає впливає на силу упора гребного гвинта та на вектор результуючої сили, що призводить до значної нелінійності параметрів даного об'єкта.
3. Для покращення якості регулювання і стабілізації руху апарата в системі керування було враховано функцію зміни сили упора від кута

та швидкості потоку, що набігає. Отримані залежності можуть бути враховані при синтезі регуляторів систем автоматичного керування, що дозволить значно підвищити точність керування і стабілізації траєкторного руху підводного апарату.

Список використаної літератури

1. *Гофман, А. Д.* Двигательно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Ленинград: Судостроение, 1988. 360.
2. *Вельтищев, В. В.* Анализ влияния скошенного потока на рабочие характеристики двигателей необитаемых подводных аппаратов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. М: Машиностроение, 2010. 97–106.
3. *Müller, E.* Results of open Water tests witch ducted and nonducted propellers witch angle of attack from 0 to 360 deg. Polish Acad. Of Sci. Proc.of Symposium «Advance in propeller research and design». Gdansk. 1981.
4. *Багницкий, А. В.* Автоматизация подготовки миссии для автономного необитаемого подводного аппарата в задачах обследования акваторий. Подводные исследования и робототехника, 2(10), 2010. 17–24.
5. *Блінцов, С. В.* Теоретичні основи автоматичного керування автономними підводними АНПАрами. Миколаїв: НУК, 2014. 222.
6. *Блінцов, С. В., Грудініна Г. С.* Застосування математичної моделі руху для побудови оптимальної за швидкодією системи керування для компенсації зовнішніх збурень. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. Миколаїв: НУК, 3, 2008. 184.
7. *Ставинський, А. А., Блінцов, С. В.* Удосконалення математичної моделі самохідного підводного АНПАрата для дослідження просторового руху. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. Миколаїв: НУК, 3 (396), 2004. 161–166.
8. *Девнин С. И.* Аэрогидромеханика плохобтекаемых конструкций. Ленинград:Судостроение, 1983. 320.
9. *Слижевский Н. Б.* Ходкость и управляемость подводных технических средств. Учебное пособие. Николаев: УГМТУ, 148 с.
10. *Yuh, J.* Modeling and control of underwater robotic vehicles. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., 20, 1998. 6.
11. Математическое моделирование в MATLAB. Разработка и оптимизация математических моделей сложных систем. Отримано з <https://matlab.ru/solutions/tech-calc/mathmod>.
12. *Блінцов, С. В., Грудініна, Г. С.* Застосування математичної моделі руху для побудови оптимальної за швидкодією системи керування для компенсації зовнішніх збурень. Збірник наукових праць НУК, 3, 2008. 77-83.
13. *Вельтищев, В. В., Гладкова, О. И.* Исследование взаимовлияния конту-

- ров управления АНПА «Император» с учётом особенностей организации его движительно-рулевого комплекса. Молодёжный научно-технический Вестник, ФС77-51038. 2015. Отримано з <http://sntbul.bmstu.ru/doc/724988.html>.
14. *Marwah Almasri, Khaled Elleithy, Abrar Alajlan*. Sensor Fusion Based Model for Collision Free Mobile Robot Navigation. *Sensors*, 16(1), 2015. 24.
 15. *Antonio Pascoal, Joerg Kalwa, Marina Carreiro-Silva*. The European Project MORPH: Distributed UUV Systems for Multimodal, 3D Underwater Surveys. *Marine Technology Society Journal*, 5(4), 2016. 26–41.
 16. *Лазарев, Ю. Ф.* Моделирование динамических систем у Matlab. Київ: НТУУ «КПІ». 2014.
 17. *Киселёв, Л. В.* Проблемно-ориентированные модели динамики и управления движением автономных подводных роботов. XII Всероссийское совещание по проблемам управления. Москва: ВСПУ. 2014.
 18. *Vinicius Graciano Santos, Luiz Chaimowicz*. Cohesion and segregation in swarm navigation. *Robotica*, 32 (2), 2014. 209–223.
 19. *Малахов, А. В., Демидюк, А. В., Пучков, О. С.* Метод расчета работы гребного винта в составе винто-рулевой колонки, работающей в качестве движительно-рулевого комплекса судна. Збірник наукових праць СевНТУ, 147, 2014. 26–30.
 20. *Бражко, А. С. Король, Ю. М.* Моделирование работы гребного винта в насадке в косом набегающем потоке. Збірник наукових праць НУК, 1, 2013. 12–16.
 21. *Багницкий, А. В.* Автоматизация подготовки миссии для автономного необитаемого подводного аппарата в задачах обследования акваторий. Подводные исследования и робототехника, 2(10), 2010. 17–24.
 22. *Gavrilov, V. M.* New Possibilities of Autonomous Gliding and drifting Vehicles in Oceanography. Report on the Seminar in the department of Ocean Engineering. Florida Atlantic University, USA. 2002.