

УДК: 681.52: 629.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.176673

Математичне моделювання роботи рушійно-стернового комплексу автономного ненаселеного підводного апарату у косому потоці води

В. С. Блінцов, Г. С. Грудініна

Проводиться дослідження нелінійних гідродинамічних характеристик рушійно-стернового комплексу (РСК), які впливають на точність плоского траєкторного руху автономного ненаселеного підводного апарату (АНПА). При криволінійному русі підводного апарату його РСК працює у косому потоці води, що набігає. Це призводить до зниження сили упору РСК і негативно впливає на керований траєкторний рух підводного апарату. Дослідження було проведено для конкретного типу АНПА для режиму плоского криволінійного руху.

У якості методу дослідження було обрано метод математичного моделювання. З цією метою відому математичну модель руху АНПА доповнено системою керування, що імітує траєкторний рух АНПА. Розроблена модель складається з чотирьох основних блоків: удосконаленої моделі АНПА; блоку задання швидкості руху апарату; блоку керування кутом повороту насадки; блоку, який містить заздалегідь підготовлені траєкторії руху АНПА.

Представлено результати дослідження гідродинамічних параметрів АНПА для декількох типових траєкторій його руху. До досліджуваних параметрів належать наступні: необхідний кут повороту насадки; дійсна траєкторія руху апарату; швидкість руху апарату; момент на валу гребного електродвигуна; упор гребного гвинта.

В результаті проведених досліджень побудовано діаграму залежності упору гребного гвинта від кута повороту насадки АНПА в діапазоні швидкості від 0,2 м/с до 1 м/с та при повороті насадки в діапазоні до 35°. Сформовано трьохвимірну матрицю, яка описує залежність упору гребного гвинта від кута потоку води, що набігає, та швидкості руху апарату. Отримана залежність може бути використана при синтезі регуляторів систем автоматичного керування плоским маневровим рухом АНПА підвищеної точності

Ключові слова: автономний ненаселений підводний апарат, рушійно-стерновий комплекс, математичне моделювання, поворотна насадка

1. Вступ

Сьогодні у провідних морських країнах світу створюються автономні ненаселені підводні апарати (АНПА), які суттєво відрізняються за архітектурно-конструктивним типом, масо-габаритними параметрами та глибинами застосування. Однак всі різновиди АНПА поєднують загальна властивість – здатність керованого траєкторного (плоского чи просторового) руху.

Сили, що діють на підводний апарат під час такого руху, визначають його динаміку та суттєво впливають на керованість апарату. Тільки маючи повні відомості про всі сили, що впливають на АНПА, а також про засоби керування

ними, можна визначати умови, за яких можливою є побудова ефективних систем автоматичного керування апаратом.

Саме тому, останнім часом все більше уваги приділяють дослідженню та удосконаленню систем автоматичного керування рушійно-стерновими комплексами (РСК) таких апаратів. Особливо актуальним таке завдання є для АНПА з РСК типу «гребний гвинт – поворотна насадок», які забезпечують покращену керуваність підводного апарата.

Для успішного розв'язку цього завдання доцільно застосовувати методи математичного моделювання траєкторного руху апарата, враховуючи при цьому гідродинамічні характеристики гребного гвинта у поворотній насадці.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [1] звертають увагу на широке застосування АНПА в оглядово-пошукових операціях, що вимагають організації точних рухів уздовж заданих траєкторій, та визначаються алгоритмом пошуку. Відповідно, при конструюванні АНПА їх структура повинна відображати характер вирішуваних завдань і вимоги до їх відпрацювання, враховувати стан зовнішнього середовища і вплив зовнішніх збурень.

В роботі [2] описується тренажер, спеціально розроблений для автономних ненаселених підводних апаратів. Тренажер дозволяє проводити експериментальні дослідження і не потребує використання функціональних прототипів морської робототехніки, що значно зменшує вартість експериментів. Однак для досягнення універсальності даного тренажеру використовується досить складна математична модель, яка ускладнюється з додаванням нових функціональних можливостей тренажеру.

В роботах [3, 4] також представлені зразки розроблених моделей автономних підводних апаратів. Однак питання спрощення математичних моделей представлених зразків та досліджень їх роботи у косому потоці води залишається невирішеним.

В роботі [5] представлено математичну модель підводного апарату з хвилеподібним рухом. Дану модель пропонується використовувати для попереднього налаштування системи керування нових підводних апаратів. Для проведення експериментів пропонується використання CFD-пакетів для моделювання, що збільшує витрати часу на дослідження та значно ускладнює технологію його проведення.

Авторами [6] розроблено математичну модель підводного апарату «Есо Маргер», заснованого на розрахунках з використанням CFD-пакетів. У статті розкривається питання необхідності контролю важливих гідродинамічних параметрів апарату та застосування відповідного середовища моделювання. Однак питання уточнення енергетичних характеристик РСК підводного апарата при його маневруванні не розглядається.

Структура моделі, представленої в [7], містить три основні блоки: блок моделі підводного апарата, блок моделей датчиків та блок моделі навколишнього середовища. Модель навколишнього середовища включає гідростатичну та гідродинамічну складові, які впливають на АНПА. На основі даної платфор-

ми користувачу пропонується спеціально розроблені сценарії поведінки підводного апарата. Проте, питання зміни упорів РСК при маневровому русі АНПА у статті не розглядаються.

В роботах [8, 9] розкривається питання підвищення точності моделювання з урахуванням гідродинамічних характеристик автономних підводних апаратів. Для досягнення необхідної маневреності підводного апарату необхідно застосовувати точну гідродинамічну модель та складну систему керування. В представлених роботах для урахування динамічного потоку застосовуються програмне забезпечення CFD. Однак залишається невирішеним питання визначення нелінійних гідродинамічних характеристик АНПА під час криволінійного руху. Для урахування важливих параметрів динаміки руху апарата застосовують складні математичні моделі.

У [10] автори представляють кінематичні та динамічні рівняння моделі підводного робота з двома обертовими двигунами. Запропоновані рівняння реалізуються за допомогою віртуального середовища, реалізованого в MATLAB і LabVIEW. Перевагою такого підходу є можливість застосування досить простих і добре апробованих інженерних пакетів, а недоліком – відсутність в них модулів для дослідження роботи РСК у косому потоці води, яка набігає.

Робота [11] спрямована на відображення розрахунку динамічної моделі АНПА, заснованої на наборі проведених експериментів. Модель розроблена для синтезу алгоритмів керування та навігаційних систем. Автори вказують, що для розробки системи керування підвищеної точності необхідно враховувати всі параметри, які впливають на апарат під час виконання поставленої місії. Особливу увагу необхідно приділити тим параметрам, які мають нелінійні характеристики, наприклад сила упору гребного гвинта, у роботі в косому потоці води. Запропонована авторами методика надає можливість розробляти точні системи керування, однак є досить складною у реалізації та потребує значних обчислюваних ресурсів.

Виконаний огляд свідчить, що попри добре вивчені питання математичного моделювання АНПА невисвітленим у науковій літературі залишається питання роботи РСК таких апаратів у скошеному потоці води, що набігає. Такий режим роботи РСК виникає при маневруванні АНПА і призводить до зміни характеристик РСК у порівнянні з режимом прямолінійного руху.

Вивчення особливостей роботи РСК у косому потоці води, що набігає, дасть змогу синтезувати системи керування просторовим рухом підвищеної точності. Ефективним інструментом для такого вивчення є метод математичного моделювання руху АНПА. При цьому важливою умовою є застосування спрощених моделей, які можна досліджувати за допомогою широко доступних пакетів комп'ютерних програм, зокрема, пакету Simulink (Math works, США).

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є встановлення залежності упору рушійно-стернового комплексу «гребний гвинт – поворотна насадку» АНПА від швидкості та кута потоку води, що набігає. Встановлена залежність має слугувати теоретичною основою для синтезу систем керування АНПА підвищеної точності.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити математичну модель плоского криволінійного руху АНПА з РСК типу «гребний гвинт у поворотній насадці»;
- дослідити плоский криволінійний рух АНПА з обраним типом РСК методом математичного моделювання;
- синтезувати залежності упору РСК від швидкості руху АНПА та кута потоку води, що набігає.

4. Дослідження гідродинамічних параметрів рушійно-стернового комплексу автономного ненаселеного підводного апарата під час плоского криволінійного руху

4.1. Моделювання плоского криволінійного руху автономного ненаселеного підводного апарата в системі Simulink

Застосування математичного моделювання для дослідження силових характеристик рушійно-стернового комплексу АНПА під час криволінійного руху дозволить отримати попередні результати перед натурним випробуванням.

В основу моделі плоского криволінійного руху АНПА було покладено наступну систему рівнянь [12]:

$$L \frac{di}{dt} = K_u u_x - r_\alpha i - \frac{c\Phi}{k_p} \omega, \quad (1)$$

$$J_{\Gamma\Gamma} \frac{d\omega}{dt} = M_{ED} - Q = \frac{c\Phi}{k_p} i - \frac{K_Q \rho D^5}{4\pi^2} \omega^2, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (m_{ПА} + \lambda_x) \frac{dV_x}{dt} &= P_{\Gamma\Gamma} - F_x - F_{Dx} = \\ &= \frac{K_T \rho D^4}{4\pi^2} \omega^2 - \frac{\rho C_x \Omega}{2} V_x^2 - F_{Dx}, \end{aligned} \quad (3)$$

де:

- i – миттєве значення електричного струму якоря гребного електродвигуна;
- u_x , K_u – керуючий сигнал регулятора напруги та його коефіцієнт підсилення, відповідно;
- L , r_α , c , Φ – електромагнітні параметри гребного електродвигуна;
- ω – кутова частота обертання гребного гвинта;
- k_p – коефіцієнт передачі редуктора;
- $J_{\Gamma\Gamma}$ – приведений до гвинта момент інерції системи «гребний електродвигун – редуктор – валопровід – гребний гвинт»;
- $M_{ED} = \frac{c\Phi i}{k_p}$ – рушійний момент гребного електродвигуна;

- Q – гальмівний момент, що створюється гребним гвинтом РСК АНПА;
- K_Q – безрозмірний нелінійний коефіцієнт, що характеризує момент гребного гвинта;
- ρ – питома густина води;
- D – діаметр гребного гвинта;
- $m_{\text{АНПА}}, \lambda_x$ – маса АНПА та приєднана маса води;
- V_x – поточна швидкість руху АНПА по осі x ;
- $P_{\text{ГТ}}$ – 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 АНПА;
- C_x – гідродинамічний коефіцієнт корпусу АНПА по осі x ;
- Ω – площа змоченої поверхні зовнішнього корпусу АНПА;
- F_{Dx} – сила зовнішнього збурення, яка діє на корпус АНПА при його русі по осі x .

Зазвичай гідродинамічні обводи корпусів АНПА обирають такими, щоб їх обтікання потоком води мало ламінарний характер. При цьому РСК виносять за корпус АНПА так, що гребний гвинт працює у практично не збуреному потоці.

Прикладом такої конструкції АНПА є підводний апарат проекту «Скарус-1» виробництва Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна. (рис. 1). Такий АНПА має стиснену краплеподібну форму, у кормовій частині якої розміщено два РСК типу «гребний гвинт – поворотна насадка». Вказані рушії максимально віддалені від основного корпусу апарата і при швидкостях руху до 1 м/с працюють у ламінарному потоці води.

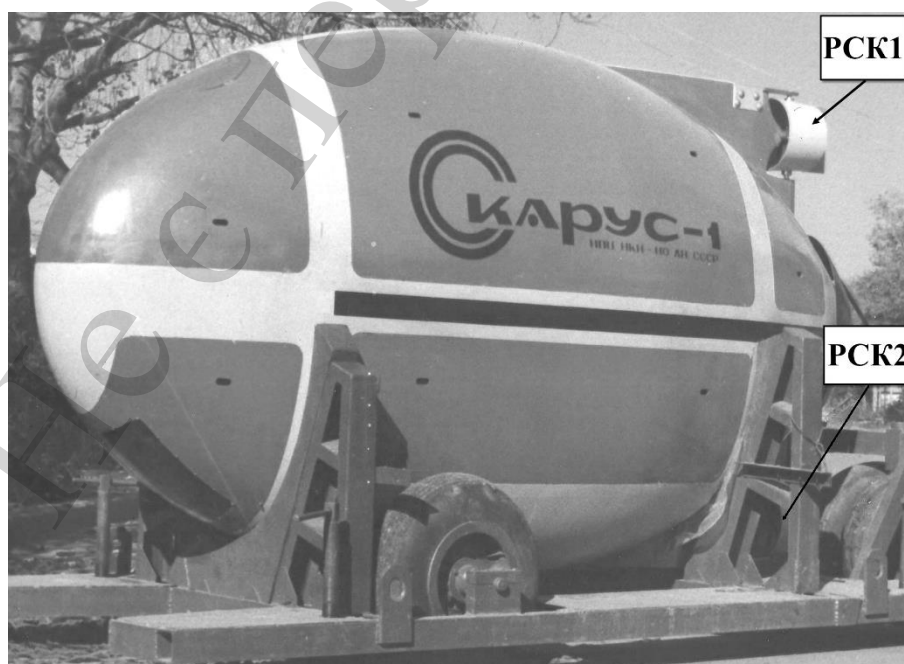


Рис. 1. Зовнішній вигляд АНПА проекту «Скарус-1»

Симулінк-реалізація системи рівнянь (1)–(3) має вигляд:

$$\left(K_u \cdot u(1) - r_x \cdot u(3) - (c\Phi / k_p) \cdot u(2) \right) \cdot \Delta t + u(3), \quad (4)$$

$$\left((c\Phi / k_p) \cdot u(1) - u(2) \right) / J_{\Gamma\Gamma} \cdot \Delta t + u(3), \quad (5)$$

$$\left(u(1) - 0,5 \cdot \rho C_{\gamma} \Omega \cdot u(2) \cdot \text{abs}(u(2) + u(3)) \right) / (m_{\text{ПА}} + \lambda_z) \cdot \Delta t + u(2), \quad (6)$$

де $u(1)$, $u(2)$, $u(3)$ – назва сигналів, які надходять до входів відповідних блоків [14]. Більш детально реалізацію даної моделі в Simulink розглянуто в [12].

Представлена математична модель враховує нелінійність кривих дії гребного гвинта та апроксимує ці залежності за допомогою багатошарової нейронної мережі з прямим розповсюдженням сигналу [13].

4. 2. Доповнення моделі автономного ненаселеного підводного апарата рівняннями рушійно-стернового комплексу для моделювання криволінійного руху

4. 2. 1. Визначення параметрів гребного гвинта у поворотній насадці

У якості РСК було обрано гребний гвинт у поворотній насадці, загальний вигляд якого представлено на рис. 2 [17].

Упор, створений роботою гребного гвинта у поворотній насадці P_k , можна представити у вигляді суми упорів гребного гвинта $P_{\Gamma\Gamma}$ та самої насадки P_n :

$$P_k = P_{\Gamma\Gamma} + P_n = P_{\Gamma\Gamma} \cdot (1 + t_n), \quad (7)$$

де $t_n = \frac{P_n}{P_{\Gamma\Gamma}}$ – коефіцієнт засмоктування поворотної насадки.

Коефіцієнт засмоктування насадки залежить від ступеню навантаження усього комплексу по упору, що характеризується коефіцієнтом σ_k . Орієнтовне значення t_n можна визначити за табл. 1 [16].

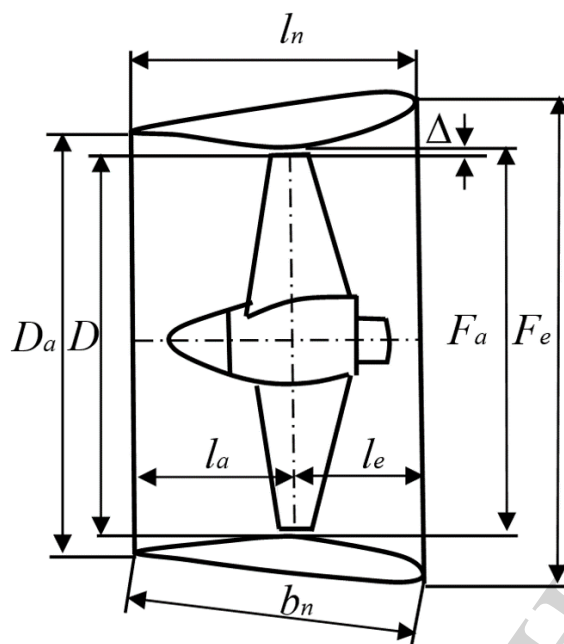


Рис. 2. Геометричні параметри поворотної насадки: D – діаметр гребного гвинта; F_n – площа робочого перерізу насадки; F_e – площа вхідного отвору насадки; F_a – площа вихідного отвору насадки; l_n – довжина насадки; l_e – довжина вхідної частини насадки; l_a – довжина хвостової частини насадки; b_n – хорда профілю насадки, Δ – зазор між гребним гвинтом та насадкою

Таблиця 1

Значення коефіцієнта t_n

σ_k	1	2	3	4	5	6	7	8	10	∞
t_n	0.23	0.32	0.39	0.44	0.48	0.52	0.55	0.58	0.62	0.9

Доповнивши рівняння розрахунку упору гребного гвинта (8) рівняннями упору насадки (7), отримаємо розрахункову модель роботи РСК «гребний гвинт – поворотна насадка».

4. 2. 2. Розробка математичної моделі рушійно-стернового комплексу «гребний гвинт – поворотна насадка», який функціонує у скошеному потоці води, що набігає

Оскільки РСК працює у ламінарному потоці, то при зміні кута повороту насадки комплекс починає працювати у скошеному, але не збуреному потоці води. Як правило, розрахунок упору гребного гвинта виконують за умов роботи рушійно-стернового комплексу у співвісному потоці води. Однак, внаслідок зміни кута потоку, що набігає на гребний гвинт, гідродинамічні характеристики РСК значно змінюються. При перекладанні насадки на кут δ_n симетричність обтікання потоком рушійно-стернового комплексу порушується, що призводить до появи складової швидкості потоку \vec{V}_n , усереднений напрям якої може бути прийнято перпендикулярним до осі насадки. Вісь потоку комплексу, відповідно до рівності:

$$\vec{V}_\delta = \vec{V}_x - \vec{V}_n, \quad (8)$$

відхиляється від осі гребного валу в ту ж сторону, що і насадка на деякий кут δ_c . Упор комплексу \vec{P}_k , в даному випадку, розкладається на дві складові: реакцію відхиленого на кут δ_c потоку \vec{P}_δ , і додаткову реакцію \vec{R}_δ , що виникає при набіганні частини потоку на відхилений профіль поворотної насадки. Застосування векторної форми закону збереження кількості руху до рівності (8), дозволяє отримати наступний результат [14]:

$$\vec{P}_\delta = \vec{P}_k - \vec{R}_\delta. \quad (9)$$

Проектування векторів (8) та (9) на діаметральну та горизонтальну площини (рис. 3) дозволяє отримати наступний результат:

$$P_x = P_\delta \cos \delta_c = P_k (1 - \sin^2(\theta_n \delta_n)), \quad (10)$$

$$P_y = P_\delta \sin \delta_c = P_k \sin(\theta_n \delta_n) \cos(\theta_n \delta_n), \quad (11)$$

де θ_n – коефіцієнт для насадки без стабілізатора, що залежить від відносної довжини насадки $l_n = \frac{L_n}{F_a}$, (рис. 2).

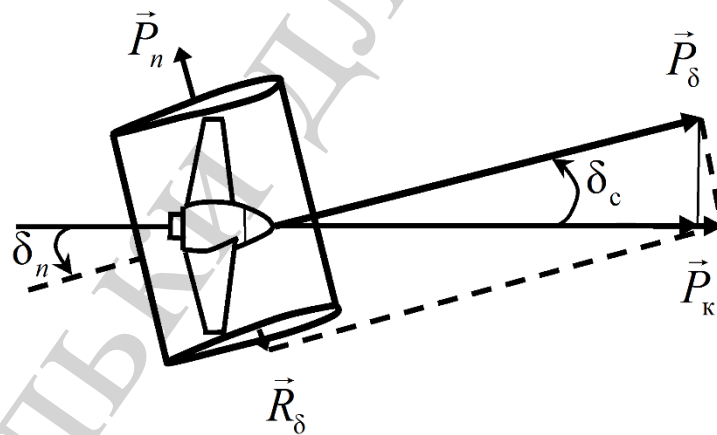


Рис. 3. Схема сил, що створюються рушієм, що працює у скошеному потоці води

Тоді

$$P_k = \sqrt{(P_x)^2 + (P_y)^2}. \quad (12)$$

Внаслідок збільшення сили упору, при зміні кута потоку, зростає і зусилля на гребному валу.

При цьому, обертальний момент на валу гребного гвинта можна визначити наступним чином [14]:

$$M'_{\text{де}} = M'_c \left(1 + \sin^2(\theta_n \delta_n)\right), \quad (13)$$

де M'_c – момент обертання гребного гвинта у співвісному потоці.

До досліджуваних параметрів належать гідродинамічні характеристики РСК, який працює у скошеному потоці води: сила тяги гребного гвинта та момент на валу гребного електродвигуна.

Отримані математичні рівняння (10)–(13), мовою Simulink мають наступний вид:

$$T_x = u(1) \cdot \left(1 - \sin(u(2) \cdot 0,6)\right)^2, \quad (14)$$

$$T_y = u(1) \cdot \sin(u(2) \cdot 0,6) \cdot \cos(u(2) \cdot 0,6), \quad (15)$$

$$T = \text{sqrt}\left(\left(u(1)^2\right) + \left(u(2)^2\right)\right), \quad (16)$$

$$Q = Q = u(2) \cdot \left(1 + \left(\sin(u(1) \cdot 0,6)\right)^2\right), \quad (17)$$

де $u(1)$, $u(2)$ – назва сигналів, що надходять на входи відповідних блоків; T – сила тяги гребного гвинта; Q – момент на валу гребного електродвигуна.

Більш детально реалізацію даної моделі в Simulink розглянуто в [14].

4. 2. 3. Аналіз типових видів траєкторій руху автономного ненаселеного підводного апарату

Розглянемо найбільш поширені види траєкторій.

З проведеного аналізу [12, 18] можна відзначити наступні типові режими просторового (траєкторного) руху АНПА, що визначають вимоги до їх систем автоматичного керування (рис. 4):

- 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 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.

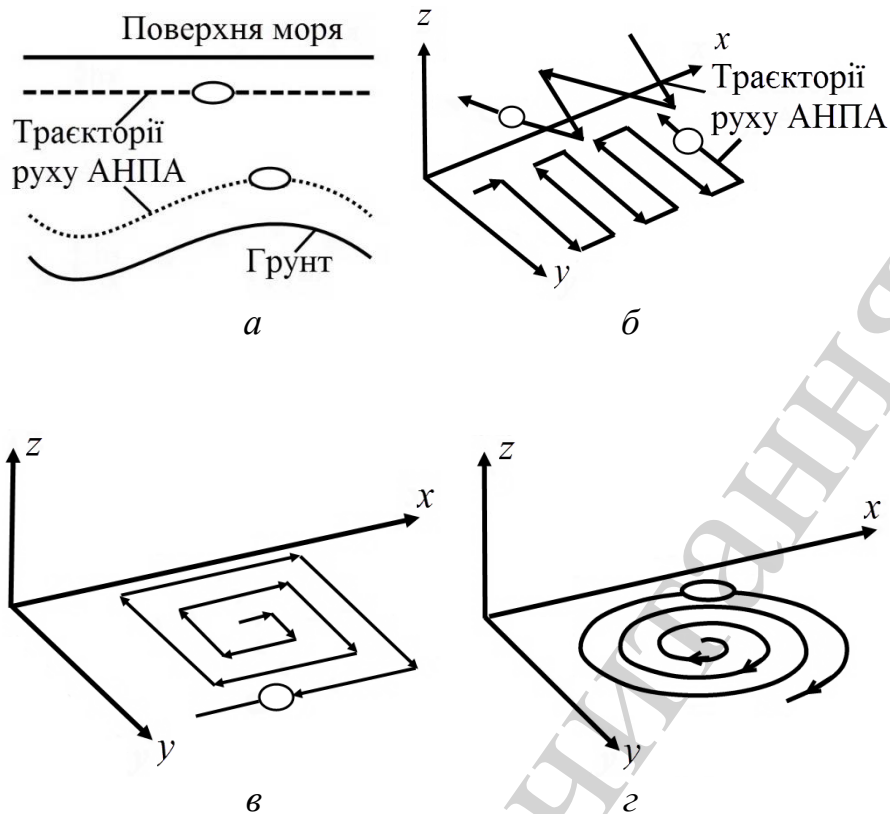


Рис. 4. Типові траєкторії стабілізованого руху АНПА: *a* – лінійний рух зі стабілізацією глибини занурення та траєкторний рух зі стабілізацією висоти над грунтом; *б, в, z* – відповідають плоскому криволінійному руху

Отже, траєкторії типу 4, *б–z* відповідають плоскому криволінійному руху, тому можуть бути застосовані при моделюванні траєкторного руху АНПА.

4. 3. Розробка додаткової структури моделі для імітації плоского траєкторного руху автономного ненаселеного підводного апарата

На базі математичних моделей АНПА ((1)–(3), [12]) та РСК типу «гребний гвинт – поворотна насадка» ((9)–(13), [14]) створено Simulink-модель, що імітує рух АНПА по заданій траєкторії. Загальний вигляд моделі представлено на рис. 5.

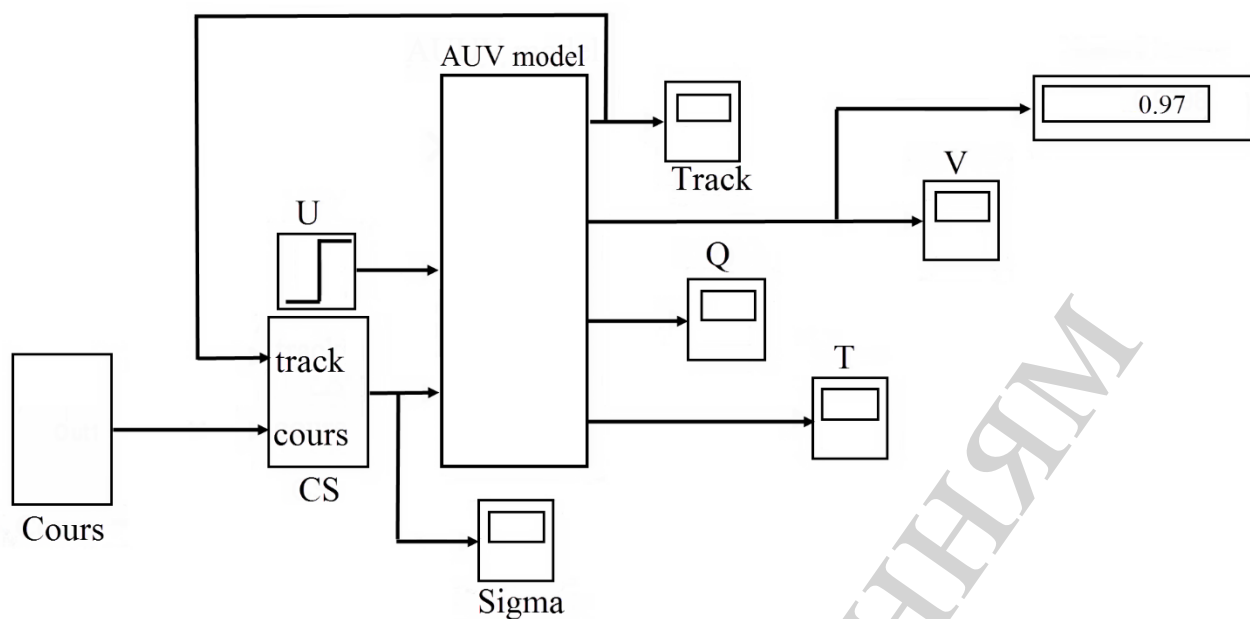


Рис. 5. Математична модель траєкторного руху АНПА

Розроблена модель складається з чотирьох основних блоків: «U», «Cours», «CS» та «AUV model».

Блок «AUV model» – модель АНПА згідно (4)–(6), удосконалена шляхом урахування роботи РСК у косому потоці води згідно (13)–(16). В даному випадку АНПА рухається під дією упору гребного гвинта у поворотній насадці, який через редуктор приводиться в рух електродвигуном постійного струму незалежного збудження.

Блок «U» – призначений для завдання необхідної швидкості руху АНПА «V» шляхом подавання відповідної напруги живлення на гребний електродвигун.

Блок «CS» – додана до моделі АНПА структура, що імітує траєкторний рух підводного апарата. Даний блок керує кутом повороту насадки «sigma». На вхід блоку «Sigma» надходить сигнал «track», який відповідає значенню поточної (реальної) траєкторії руху апарату ($y(t)$). На вхід «cours» надходить значення курсу, яке відповідає значенню заданої траєкторії руху. Даний блок обчислює похибку, та в залежності від її значення та знаку визначає кут повороту насадки.

Блок «Cours» – містить у собі заздалегідь підготовлені траєкторії руху АНПА у вигляді функцій $y(t)$, які обираються та підключаються по черзі оператором.

До параметрів, які спостерігаються, відносяться: «Sigma» – кут повороту насадки, град.; «Track» – реальна траєкторія руху апарату $y(t)$; «V» – швидкість руху м/с; «Q» – момент на валу гребного електродвигуна Н·м; «T» – упор гребного гвинта Н.

4. 4. Моделювання траєкторного руху автономного ненаселеного підводного апарата

У дослідженні розглядається тільки траєкторний рух в горизонтальній площині (стабілізований по глибині) рис. 6, б – з [18].

Проведемо моделювання траєкторного руху діючого макету АНПА проекту «Скарус-1» з наступними характеристиками:

- маса – 60 кг;
- швидкість ходу – 1 м/с;
- діаметр гребного гвинта – 160 мм;
- діаметр поворотної насадки – 166.4 мм;
- відносна довжина поворотної насадки – 1.0.

В першому експерименті оберемо кусково-ламану траєкторію (рис. 4, в). На рис. 6 представлено результати моделювання. Швидкість руху 1 м/с, керований кут перекладки керма.

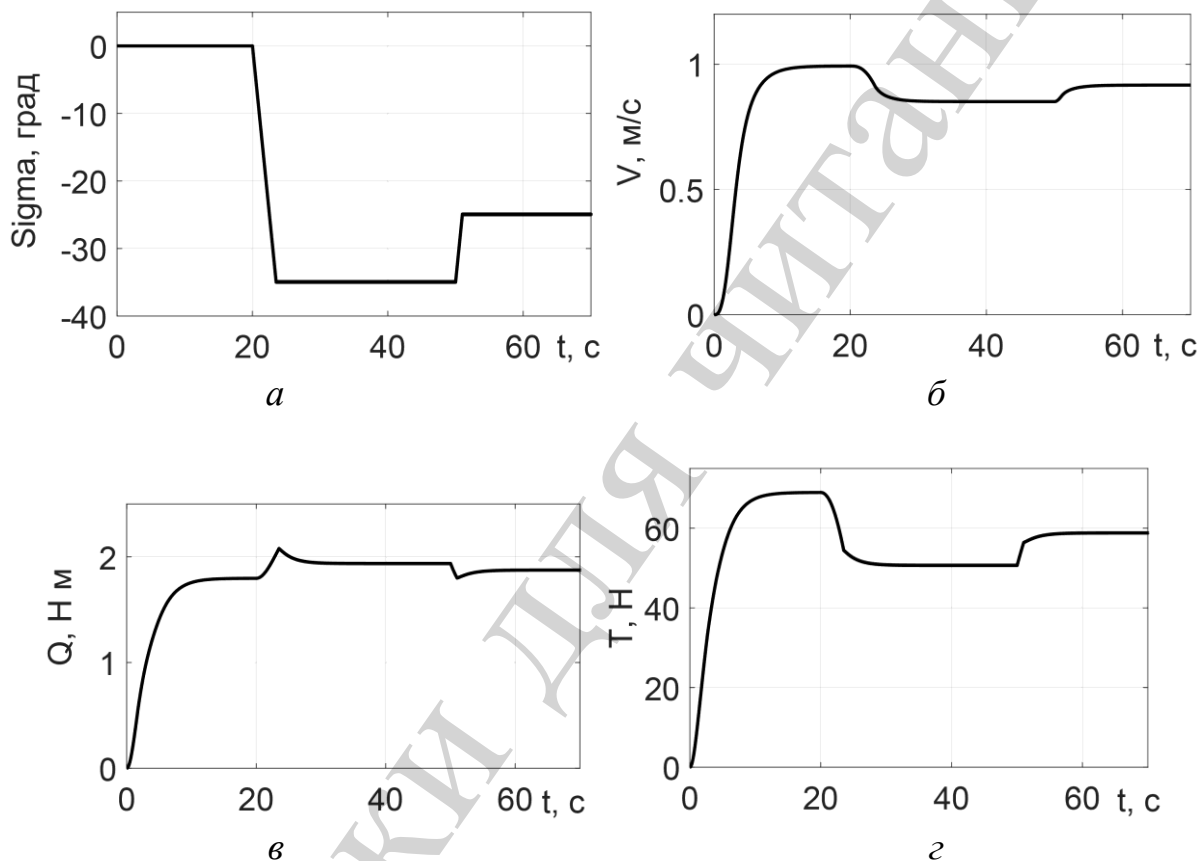


Рис. 6. Рух АНПА по кусково-ламаній траєкторії: *а* – необхідний кут повороту насадки; *б* – швидкість руху апарату; *в* – момент на валу; *г* – упор гребного гвинта

В другому експерименті оберемо траєкторію з обходом перешкоди. На рис. 7 представлено результати моделювання.

В наступному експерименті проведемо моделювання траєкторного руху АНПА прямокутними галсами (рис. 4, в). На рис. 8 представлено результат моделювання.

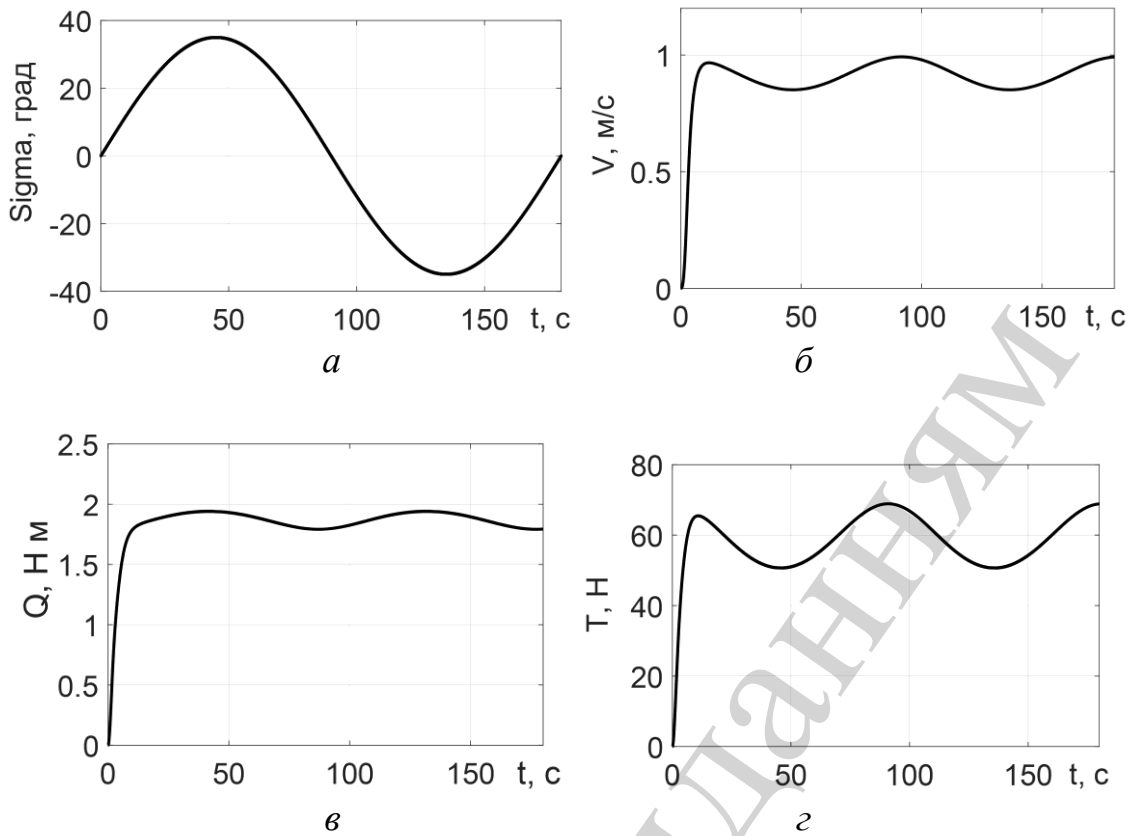


Рис. 7. Рух АНПА по траєкторії з обходом перешкоди: *a* – необхідний кут повороту насадки; *б* – швидкість руху апарату; *в* – момент на валу; *г* – упор гребного гвинта

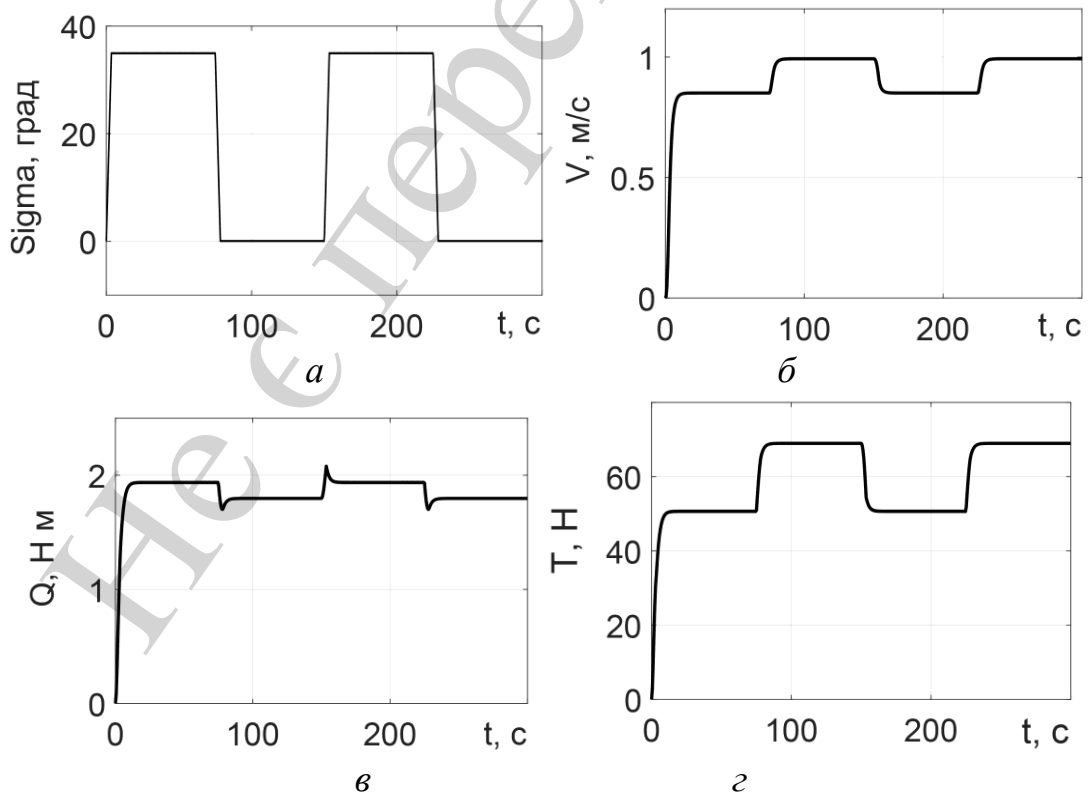


Рис. 8. Траєкторний рух АНПА прямокутними галсами: *a* – необхідний кут повороту насадки; *б* – швидкість руху апарату; *в* – момент на валу; *г* – упор

Як видно з представлених графіків рис. 8, розроблена математична модель дозволяє дослідити ряд важливих параметрів: швидкість, упор, момент – під час криволінійного руху АНПА.

5. Синтез залежності упору рушійно-стернового комплексу від швидкості руху автономного ненаселеного апарату, та кута потоку води, що набігає

Розроблену математичну модель було використано для дослідження характеру нелінійної залежності упору РСК від кута потоку води, що набігає (зміни кута повороту насадки до 35°) та швидкості руху АНПА в діапазоні $0,2-1,0$ м/с (рис. 9).

Аналіз отриманих результатів показує, що при малих швидкостях руху АНПА упор РСК практично не залежить від кута повороту насадки. Однак зі збільшенням швидкості руху АНПА (швидкості потоку, що набігає) упор РСК зменшується по суттєво нелінійному закону.

Так, встановлено, що найбільше відхилення спостерігається при швидкості 1 м/с та при зміні кута повороту насадки на 35° . У порівнянні з нульовим кутом відхилення насадки упор зменшується на $7,3\%$ (зменшується з $68,99$ Н до $50,7$ Н).

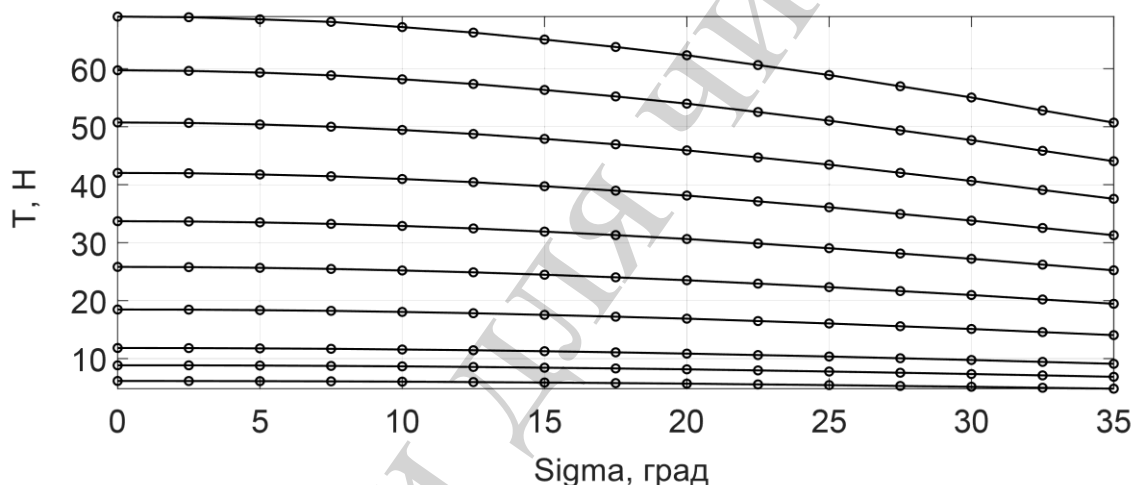


Рис. 9. Діаграма залежності упору від кута повороту насадки в діапазоні швидкості $[0,2..1]$ м/с

За допомогою розробленої моделі було проведено ряд комп'ютерних експериментів та сформовано базу даних, у вигляді трьохвимірної матриці. Отримана матриця описує залежність упору гребного гвинта від кута потоку, що набігає, та швидкості руху апарату.

За отриманими даними побудовано поверхню, що наглядно показує, в яких зонах швидкостей та кутів потоку води, що набігає, спостерігається найбільш суттєвий прояв нелінійних залежностей між цими змінними (рис. 10).

Представлена вище поверхня є графічною формою отриманої в системі Simulink тривимірної матриці даних « $G - V - \sigma$ », яку можна використати для навчання нейронної мережі системи автоматичного керування АНПА. Дану матрицю можна використати для компенсації відхилення упору РСК та, як на-

слідок, підвищення точності керування плоским криволінійним рухом підводного апарата.

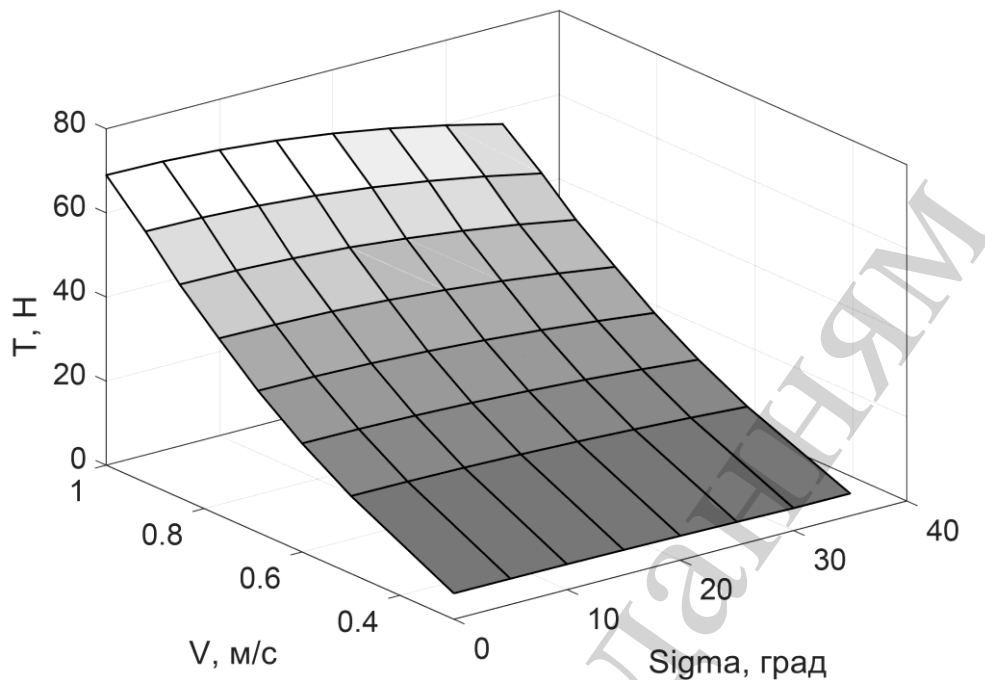


Рис. 10. Залежність упору від кута потоку, що набігає, та швидкості руху АНПА

6. Обговорення результатів математичного моделювання функціонування рушійно-стернового комплексу автономного ненаселеного підводного апарата у скошеному потоці води

За результатами дослідження встановлено, що розроблена математична модель надає можливість дослідити гідродинамічні параметри рушійно-стернового комплексу, який працює у скошеному потоці під час плоского криволінійного руху АНПА. З представлених на рис. 9 графіків видно, що зміна кута повороту насадки суттєво впливає на упор РСК, та при збільшенні швидкості руху апарату упор РСК зменшується по суттєво нелінійному закону. Це можна пояснити тим, що максимальне значення упору гребного гвинта досягається, коли РСК працює у співвісному потоці. При відхиленні насадки на деякий кут гребний гвинт починає працювати у скошеному потоці води, що призводить до зменшення сили упору.

В даному випадку проводилось моделювання руху АНПА на плоскій циркуляції у діапазоні швидкості потоку води відносно корпусу апарата від 0,2 м/с до 1 м/с. При зменшенні швидкості руху апарата менше за 0,2 м/с відхилення значення упору досить мале та носить майже лінійний характер, тому даним впливом можна знехтувати. Реалізована в Simulink математична модель описує підводний апарат із конкретними масогабаритними параметрами (п.п. 4. 4.), при цьому максимальна швидкість руху даного апарата становить 1 м/с. Визначена швидкість відповідає технічному завданню на створення АНПА.

Також необхідно зазначити, що моделювання проводилось для криволінійного руху з малими прискореннями, коли приєднаними масами води можна

знехтувати. Також з-за конструктивних особливостей АНПА в моделюванні приймається ламінарний характер потоку води, що набігає на РСК.

Більш детально вплив кута повороту насадки на упор РСК можна проаналізувати з графіків, які отримано під час моделювання траєкторного руху АНПА (рис. 6–8).

На графіку (рис. 6, *a*) видно, що на протязі 20 с АНПА рухається прямолінійно, оскільки насадка не відхилена від діаметральної площини апарата. Через 20 с починається поворот насадки на кут 35° . У цей час швидкість руху АНПА починає знижуватись, а момент на валу гребного електродвигуна – збільшуватись з-за зниження ефективності роботи насадки у косому потоці води. При досягненні насадкою кута повороту 35° апарат виконує циркуляцію зі зменшеними упором та швидкістю, а насадка працює в усталеному косому потоці води, що набігає.

Аналогічні зміни упору РСК спостерігаються також і при інших розглянутих режимах плоского траєкторного руху АНПА – обході перешкоди та русі прямокутними галсами (рис. 7, 8). Це вказує на необхідність урахування виявлених властивостей функціонування РСК при синтезі систем керування плоским рухом АНПА підвищеної точності. Перевагою отриманої моделі є можливість врахування нелінійності залежності упору гребного гвинта від кута повороту насадки, що набагато точніше описує характер залежності від лінеаризованої моделі. Уведення матриці «Т – V – Sigma» (рис. 10) до структури системи автоматичного керування рухом АНПА надасть можливість компенсувати відхилення сили упору при криволінійному русі АНПА. Це дасть змогу підвищити точність керованого руху АНПА.

Зазначимо, що отримана залежність «Т – V – Sigma» обчислена для конкретного типу АНПА (характеристики якого представлено у п.п. 4. 4.) з використанням спрощених математичних моделей гідродинаміки апарата та РСК і відображає нелінійні залежності з деякими припущеннями.

Подальше уточнення отриманої залежності планується виконати із застосуванням пакетів обчислювальної гідродинаміки (наприклад, CFD-пакету FlowVision) та проведенням експериментів з РСК у дослідницькому басейні.

7. Висновки

1. В системі Simulink реалізовано математичну модель АНПА для дослідження плоского криволінійного руху з малими прискореннями, коли приєднаними масами води можна знехтувати. До складу моделі АНПА входить математична модель РСК типу «гребний гвинт – поворотна насадка», який функціонує у косому потоці води, що набігає.

2. Дослідження функціонування АНПА виконано для трьох режимів плоского траєкторного руху – кусково-ламаною траєкторією, траєкторією обходу перешкоди, та прямокутними галсами. Виявлено залежність упору РСК від швидкості руху АНПА та кута відхилення поворотної насадки. Виявлено, що максимальне відхилення упору при швидкості руху 1 м/с та куті відхилення насадки 35° сягає 7,3 %.

3. За результатами моделювання побудовано тривимірну поверхню «упор РСК – швидкість потоку води – кут повороту насадки». Отримана тривимірна по-

верхня може бути включена до складу системи автоматичного керування АНПА для уточненого регулювання упору РСК при плоскому траєкторному русі.

Література

1. Cruz, N. (Ed.) (2011). Autonomous underwater vehicles. InTech., 258. doi: <https://doi.org/10.5772/923>
2. Fedorenko, R., Gurenko, B. (2016). Autonomous Underwater Vehicle Mathematical Model and Simulator. Proceedings of the 4th International Conference on Control, Mechatronics and Automation - ICCMA '16. doi: <https://doi.org/10.1145/3029610.3029639>
3. Seto, M. L. (Ed.) (2013). Marine Robot Autonomy. Springer, 382. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5659-9>
4. Gerigk, M., Wojtowicz, S. (2015). An Integrated Model of Motion, Steering, Positioning and Stabilization of an Unmanned Autonomous Maritime Vehicle. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 9 (4), 591–596. doi: <https://doi.org/10.12716/1001.09.04.18>
5. Szymak, P. (2016). Mathematical Model of Underwater Vehicle with Undulating Propulsion. 2016 Third International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry (MCSI). doi: <https://doi.org/10.1109/mcsi.2016.057>
6. Wang, C., Zhang, F., Schaefer, D. (2014). Dynamic modeling of an autonomous underwater vehicle. Journal of Marine Science and Technology, 20 (2), 199–212. doi: <https://doi.org/10.1007/s00773-014-0259-0>
7. Tan, K. M., Anvar, A., Lu, T. F. (2012). Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Dynamics Modeling and Performance Evaluation. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, 6 (10), 2147–2155. URL: <https://waset.org/publications/9586/autonomous-underwater-vehicle-auv-dynamics-modeling-and-performance-evaluation>
8. Yang, R. (2016). Modeling and robust control approach for autonomous underwater vehicles. Ocean University of China ENSTA Bretagne, 274. URL: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01484819/file/These-2016-SICMA-STIC_automatique-YANG_Rui.pdf
9. Yeo, K. B., Wong, T. H., Ong, C. M. (2014). Modelling and Manoeuvrability Design of Autonomous Underwater Vehicle. Journal of Applied Sciences, 14 (10), 991–999. doi: <https://doi.org/10.3923/jas.2014.991.999>
10. Jebelli, A., Yagoub, M. C. E., Dhillon, B. S. (2017). Modeling of an Autonomous Underwater Robot with Rotating Thrusters. Advances in Robotics & Automation, 6, 162. doi: <https://doi.org/10.4172/2168-9695.1000162>
11. Valeriano-Medina, Y., Martínez, A., Hernández, L., Sahli, H., Rodríguez, Y., Cañizares, J. R. (2013). Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 19 (2), 175–200. doi: <https://doi.org/10.1080/13873954.2012.717226>

12. Блінцов, С. В. (2014). Теоретичні основи автоматичного керування автономними підводними апаратами. Миколаїв: НУК, 222.
13. Ставинський, А. А. Блінцов, С. В. (2004). Удосконалення математичної моделі самохідного підводного апарата для дослідження просторового руху. Збірник наукових праць НУК, 3 (396), 161–166.
14. Hrudinina, H. S. (2018) Mathematical modeling of an autonomous uninhabited underwater vehicle dynamics with propeller in the rotary nozzle. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*, 2 (10), 144–153.
15. Блінцов, С. В., Грудініна, Г. С., Алоба, Л. Т. (2017). Математичне моделювання динаміки автономного підводного апарата на плоскій циркуляції. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування, 4, 53–60. doi: <https://doi.org/10.15589/jnn20170407>
16. Будашко, В. В. (2017). Підвищення ефективності функціонування судових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів. Одеса, 450.
17. Юдин, Ю. И. (2010). Математическое моделирование работы поворотной винтовой насадки бурового судна при его произвольном движении. *Вестник МГТУ*, 13 (4/2), 852–856.
18. Блінцов, В. С., Грудініна, Г. С. (2018). Особливості керування стабілізованим рухом автономним ненаселеним підводним апаратом в умовах дії зовнішніх збурень. *Інформаційні системи, механіка та керування*, 19, 122–137.