

**Блінцов В.С.**

Херсонський навчально-науковий інститут  
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Грудініна Г.С.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Буруніна Ж.Ю.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Надточий А.В.**

Херсонський навчально-науковий інститут  
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

## УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ РУХУ АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА

*Удосконалено структуру системи автоматичного керування швидкістю руху автономного ненаселеного підводного апарата, рушійно-кормовий пристрій якого функціонує у скошеному потоці води, що набігає.*

*Для досягнення максимальної швидкодії при переході з однієї швидкості руху автономного ненаселеного підводного апарата на будь яку іншу задану швидкість пропонується застосування оптимального керування з перемиканням керуючого впливу за релейним законом. Система автоматичного керування містить регулятор, який в реальному часі обчислює значення і час перемикання керуючого сигналу. Регулятор побудовано на основі штучної нейронної мережі, яка апроксимує функцію часу перемикання від початкової та заданої швидкості підводного апарата. База даних для навчання штучної нейронної мережі отримана шляхом комп'ютерного експерименту з використанням математичної моделі автономного ненаселеного підводного апарата.*

*Для стабілізації швидкості руху підводного апарата при маневровому русі або під час впливу течії розроблено регулятор, що корегує значення керуючого сигналу відповідно до зміни упору його рушійно-кормового пристрою.*

*Для встановлення залежності загального упору рушійно-кормового пристрою, що застосовуються для автономних ненаселених підводних апаратів міні та малого класу, використано експериментальні дані, отримані шляхом математичного моделювання динаміки підводного апарата в системі Simulink Matlab.*

*Дослідження гідродинамічних характеристик гребного гвинта рушійно-кормового пристрою, розташованого в напрямній та поворотній насадках, проведено методами обчислювальної гідродинаміки і з застосуванням програмного комплексу FlowVision CFD. Встановлено, що відхилення упору РКП при куті перекладки насадки  $\delta = 30^\circ$  залежить від швидкості потоку та може перевищувати 50 відсотків. Відхилення упору при роботі САК становить близько 2 відсотків. Таке незначне відхилення упору рушійно-кормового пристрою майже не впливає на швидкість руху АНПА. Розроблений регулятор дозволяє компенсувати втрату упору рушійя, без відпрацювання помилки, що підвищує точність роботи системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА.*

**Ключові слова:** автономний ненаселений підводний апарат, рушійно-кормовий пристрій, автоматичне керування.

**Постановка проблеми.** Для виконання багатьох підводних робіт широко застосовуються автономні ненаселені підводні апарати (АНПА) міні та малого класу, вагою від 20 до 500 кг. Аналіз режимів роботи та умов експлуатації таких АНПА показує, що вони працюють у складних гідрометеорологічних умовах та

в умовах стисненої підводної навігації. Тому сучасною тенденцією подальшого розвитку систем автоматичного керування (САК) рухом АНПА є підвищення вимог до точності керованого руху апарата по заданій траєкторії, досягнення максимальної швидкодії при ступінчатому русі.

Для багатьох виконуваних місій успіх може залежати від спроможності рушійно-кермового пристрою (РКП) АНПА забезпечувати необхідну точність його стабілізованого руху та позиціонування. Підвищення швидкодії та точність підтримання заданої швидкості руху підводного апарату за умов зовнішнього впливу відіграють важливу роль у завданні стабілізованого руху.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд науково-технічної літератури по системам керування показує, що магістральним напрямком подальшого розвитку теорії синтезу САК АНПА в умовах невизначеності його параметрів та характеристик зовнішнього середовища є застосування елементів штучного інтелекту – нечітких і нейромережних регуляторів, а також регуляторів на базі застосування інверсних моделей об'єкту керування. При цьому математичне моделювання визнається як ефективний засіб перевірки роботи розробленої системи керування, що надає можливість уточнювати важливі параметри та гідродинамічні характеристики об'єкту керування.

Авторами [1] розроблено математичну модель підводного роботу «Есо Маррег», 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 характеристик упору та потужності РКП підводного апарата при його маневруванні не розглядається.

Роботи [2; 3] спрямовані на розробку динамічної моделі АНПА як об'єкту керування, заснованої на наборі проведених експериментів. Автори вказують на необхідність приділити увагу нелінійним параметрам, зокрема, упору гребного гвинта, у роботі в косому потоці води.

Багато робіт присвячено питанню розробки САК траєкторним рухом АНПА. На прикладі завдання руху АНПА у складних умовах автори [4] методом комп'ютерного моделювання аналізують якість методологій проходження перешкод з урахуванням дії зовнішнього збурення. Виявлено погіршення ефективності застосованих методик при дії океанічної течії. Пропонується її компенсація заздалегідь визначеними експериментальним шляхом прикладеними силами та застосуванням додаткових підрулюючих пристроїв. Але в роботі не враховується одночасна зміна швидкості руху апарату або течії, що набігає. Отже, зміна упору РКП також не враховується.

Для таких типових траєкторій руху АНПА (занурення під стабільним кутом тощо) автори [5]

пропонують застосувати ПД-регулятори із зворотнім зв'язком та доводять ефективність застосування допоміжних засобів керування для виконання маневрів. Питання стабілізації швидкості руху апарату не досліджуються.

В роботі [6] для підвищення якості керування маневровим рухом АНПА автори пропонують застосувати векторний розподіл напрямків руху. Проте, представлений регулятор не належить до класу високоточних систем керування, його головною перевагою є спрощене представлення просторового руху, що полегшує процес керування апаратом.

Модель роботи РКП в умовах збурень навколишнього середовища представлена у роботі [7]. Встановлено, що при збільшенні швидкості руху РКП (в даному випадку без врахування впливу корпусу) та збільшенні кута повороту стерна сила упору значно зменшується навіть у чистій воді. У висновках автори підкреслюють важливість проведення експериментальних досліджень методом математичного моделювання.

Виконаний огляд свідчить, що попри добре вивчені питання математичного моделювання АНПА все більше уваги приділяється питанню підвищення точності керованого руху підводних апаратів і, зокрема, дослідженням гідродинамічних параметрів РКП, що функціонують у скошеному потоці води.

**Постановка завдання.** Метою роботи є удосконалення структури системи автоматичного керування швидкістю руху автономного ненаселеного підводного апарата, рушійно-кермовий пристрій якого функціонує у скошеному потоці води.

Для досягнення поставленої мети у роботі розв'язано наступні задачі:

- обрано математичну модель руху АНПА, рушійно-кермовий пристрій якого функціонує у скошеному потоці води, що набігає;
- розроблено та досліджено структуру САК швидкістю руху АНПА, до складу якої входить оптимальний за швидкодією регулятор, який реалізує ступінчасту зміну керуючого сигналу;
- розроблено та досліджено структуру системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА зі стабілізацією упору його РКП у маневрових режимах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В основу математичної моделі динаміки АНПА покладені рівняння динаміки поступального та обертального руху твердого тіла та кінематичні рівняння зв'язку кутових і лінійних швидкостей

[8]. Зазвичай гідродинамічні обводи корпусів АНПА обирають такими, щоб їх обтікання потоком води мало ламінарний характер. При цьому РКП виносять за корпус АНПА так, що гребний гвинт працює у практично не збуреному потоці (див. рис. 1).

В роботі розглядається АНПА, що має рушій, співвісний зв'язаній системі координат і вектор упору якого проходить через центр мас апарата.

Основними складовими рушійно-кермового пристрою АНПА є гребний електродвигун (ГЕД), редуктор-валопровід (РВ) та гребний гвинт (ГГ), розміщений у напрямній чи поворотній насадці, які моделюються відомою системою нелінійних диференціальних рівнянь [8].

Упор РКП  $F_k$  можна представити у вигляді суми упорів гребного гвинта  $F_{ГГ}$  та самої насадки  $F_n$  [9]:

$$F_k = F_{ГГ} + F_n. \quad (1)$$

При перекладанні насадки на кут  $\delta_n$  симетричність її обтікання потоком рушія порушується, що призводить до появи складової швидкості  $\vec{V}_n$ , усереднений напрям якої може бути прийнято перпендикулярним до вісі насадки. Тоді, вісь потоку РКП, згідно постулату Жуковського-Чаплигіна і рівнянню  $\vec{V}_\delta = \vec{V} - \vec{V}_n$ , відхиляється від

вісі гребного валу в ту ж сторону, що і насадка, на деякий кут  $\delta_c$ . Цей кут залежить від відносної довжини насадки  $\bar{l}_n$  і може бути виражений наступним чином [10]:  $\delta_c = \theta_n \delta_n = (1 - a_n \delta_n) \delta_n$ , де  $a_n$  – коефіцієнт апроксимації, який для насадки без стабілізатора, визначається за виразом:  $a_n = 0,04838 - 0,067865 \bar{l}_n + 0,023328 \bar{l}_n^2$ .

При перекладанні насадки (рис. 2) упор РКП  $\vec{F}_k$  розкладається на дві складові: реакцію відхиленого на кут  $\delta_c$  потоку  $\vec{F}_\delta$  і додаткову реакцію  $\vec{R}_\delta$ , що виникає при набіганні частини потоку на відхилений профіль насадки.

Тому:

$$\vec{F}_\delta = \vec{F}_k - \vec{R}_\delta. \quad (2)$$

Проектування рівності (6) на діаметральну та горизонтальну площини дозволяє отримати наступний результат [11]:

$$F_x = F_\delta \cos \delta_c = F_k (1 - \sin^2(\theta_n \delta_n)), \quad (3)$$

$$F_y = F_\delta \sin \delta_c = F_k \sin(\theta_n \delta_n) \cos(\theta_n \delta_n). \quad (4)$$

Внаслідок зміни сили упору, при зміні кута потоку, зростає і зусилля на гребному валу. При цьому, обертальний момент на валу ГГ визначають наступним чином [11]:



Рис. 1. Зовнішній вигляд АНПА з винесеним поза корпус РКП: а – АНПА «PingGuin» (Німеччина); б – АНПА «Sparus II» (Іспанія)

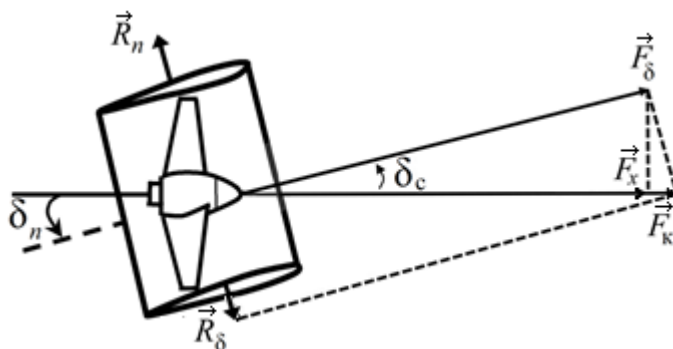


Рис. 2. Схема сил, що створюються РКП під час перекладання насадки

$$Q = Q_p (1 + \sin^2(\theta_n \delta_n)), \quad (5)$$

де  $Q_p$  – момент обертання гвинта у співвісному потоці.

З метою отримання необхідних для роботи регулятора параметрів в роботі проводилось дослідження динаміки АНПА з двома типами РКП: ГГ в напрямній насадці та ГГ в поворотній насадці.

ГГ з напрямною насадкою – один з найбільш поширених типів РКП для АНПА. Поворотна насадка представляє собою підвішене на балері кільцеве крило, всередині якого розміщується ГГ. Вісь балера насадки лежить в площині диска ГГ, чим забезпечується вільний поворот насадки на кут, який зазвичай не перевершує  $\delta = 30\text{--}35^\circ$  [12].

При математичному моделюванні було використано наступні РКП:

- для ГГ у напрямній насадці розглядалась насадка Model PN160-1, яка має коефіцієнт розкриття насадки – 1.32, внутрішній розрахунковий діаметр – 161.6 мм, відносне подовження насадки – 0.80, тип профілю – авіаційно-сегментний; при цьому ГГ мав такі характеристики: діаметр – 160 мм, дискове співвідношення – 0,57, крокове співвідношення – 0.9, тип профілю – авіаційно-сегментний, діаметр маточини – 33.4 мм;

- для ГГ в поворотній насадці розглядалась насадка PN160-2, що відрізняється від PN160-1 внутрішнім розрахунковим діаметром – 170.0 мм, який необхідний для її перекладки; ГГ однотипний з попереднім.

Розглянемо тепер розробку оптимального за швидкістю регулятора швидкості руху АНПА. Оптимальне по швидкодії керування забезпечується подачею на об'єкт максимально припустимого керуючого впливу – додатного та від'ємного, що змінюється за релейним законом. Виходячи з теореми про  $n$  інтервалів [13], в загальному випадку для досягнення оптимальності по швидкодії лінійного об'єкта  $n$ -го порядку процес керування повинен складатися з  $n$  інтервалів, у кожному з яких керуючий вплив по черзі змінюється з максимально додатного на максимальний від'ємний і навпаки.

У випадку з АНПА оптимальне за швидкістю керування при переході з однієї швидкості на іншу забезпечується подачею на об'єкт керуючого сигналу, який складається з трьох інтервалів: максимальне додатне значення  $U_{\max}$  (максимальне значення напруги живлення ГЕД) протягом інтервалу часу від 0 до  $t_1$ , максимальне від'ємне значення –  $U_{\max}$  від моменту  $t_1$  до  $t_2$

і нове усталене значення напруги  $U_{\text{уст}}$ , яке відповідає новому значенню швидкості в усталеному режимі.

Таким чином, в процесі керування необхідно визначати три величини:  $t_1$ ,  $t_2$  і  $U_{\text{уст}}$ . Для визначення  $U_{\text{уст}}$  необхідно провести серію експериментів, в яких на АНПА подається деяке значення керуючого сигналу, і він розганяється до деякої усталеної швидкості. Завдяки інтерполяції (другого ступеня) отриманих значень ( $V_{\text{АНПА}} = f(U)$ ) можна отримати  $U_{\text{уст}}$  для будь-якого значення швидкості.

Розглянемо визначення моментів перемикання  $t_1$  і  $t_2$ . Як показало моделювання, перехід з деякої початкової швидкості  $V_0$  на будь-яку іншу  $V_1$  залежить лише від величини  $t_1$ , оскільки друге перемикання (момент  $t_2$ ) необхідно робити в момент часу, коли закінчується перехідний процес, тобто прискорення дорівнює нулю, і розраховувати його немає потреби [14].

Значення часу  $t_1$  було визначено експериментальним шляхом. Методом комп'ютерного моделювання отримано набір векторів  $(V_0, t_1, V_1)$ , який характеризує залежність кінцевої швидкості від початкової швидкості і часу перемикання. Цю залежність можна апроксимувати у зворотному вигляді й отримати необхідну нам функцію  $t_1 = f(V_0, V_1)$ .

Головна перевага даного методу полягає в тому, що вибірка даних для апроксимації була отримана за допомогою математичної моделі, яка враховує всі основні нелінійності реального об'єкту.

На рис. 3 показано отриману залежність інтервалу  $t_1$  для розгону від нульової швидкості  $V_0 = 0$  до будь-якого значення  $V_1$ .

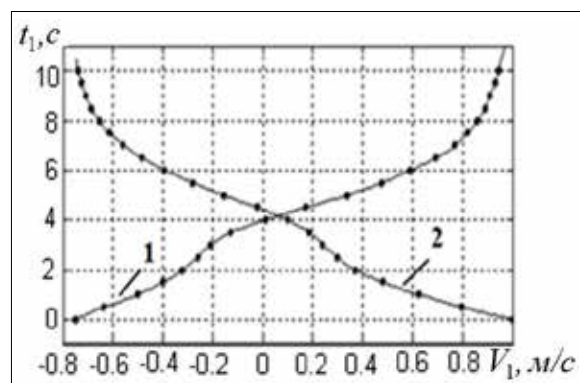


Рис. 3. Залежність часу розгону від кінцевого значення швидкості

Однак, точно апроксимувати повну залежність (розгін від будь-якого довільного початкового зна-

чення до будь-якого кінцевого, тобто функцію від двох змінних), наприклад методом найменших квадратів, досить складно з-за причини істотної нелінійності об'єкту керування. Тому, доцільним в даному випадку є застосування в якості апроксиматора інструментарію штучного інтелекту – багатошарової нейронної мережі зі зворотним поширенням похибки.

На рис. 4 показано експериментальні точки, які зняті за допомогою математичної моделі та які утворюють апроксимаційну поверхню, яку отримано за допомогою нейронної мережі після її навчання [14].

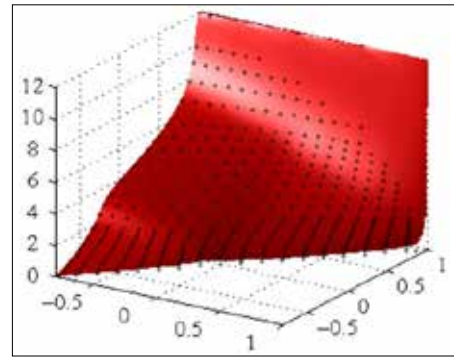


Рис. 4. Залежність часу розгону від початкової та кінцевої швидкості

Для цього була використана штучна нейронна мережа (ШНМ), що складається з двох шарів з чотирма нейронами в прихованому шарі з функцією активації у вигляді тангенціальної сигмоїди.

Структуру системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА з використанням нейрорегулятора  $NN_{рег}$  для ступінчатої зміни керуючого сигналу представлено на рис. 5.

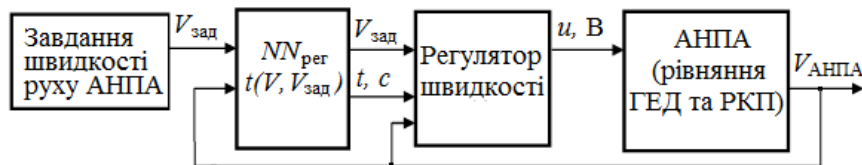
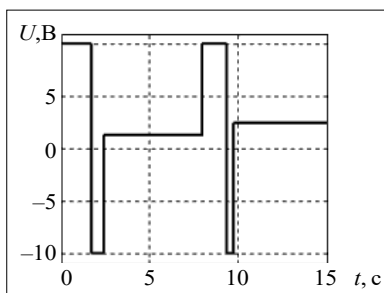
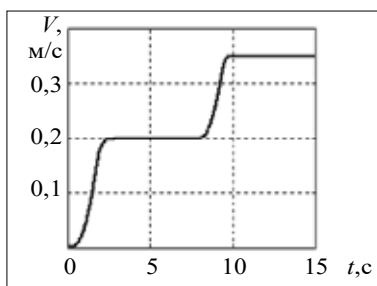


Рис. 5. Структура САК ступінчатою зміною швидкості АНПА з використанням нейрорегулятора

Моделювання руху АНПА з розробленою САК (рис. 6) показало, що регулятор на основі отриманої штучної нейромережі дійсно забезпечує максимальну швидкість та високу точність керування.



а



б

Рис. 6. Перехідний процес в оптимальній системі

**керування:**

а – керуючий сигнал; б – швидкість руху АНПА

На рис. 7 представлена порівняльна характеристика роботи САК рухом АНПА: 1 – без регулятора; 2 – на базі класичного ПД-регулятора; 3 – оптимального за швидкістю регулятора на базі ШНМ.

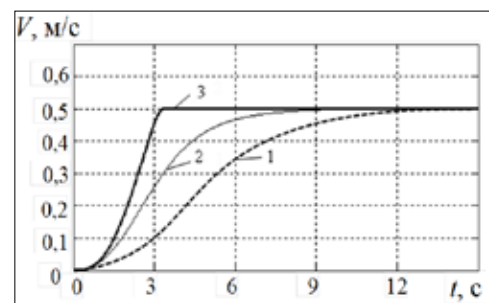


Рис. 7. Швидкість руху АНПА:

Шляхом комп'ютерного моделювання було встановлено, що під час розгону апарата з 0 м/с до 0,5 м/с перехідний процес системи з оптимальним за швидкістю регулятором триває 3,3 с, а той же процес з класичним ПД-регулятором – 9,2 с, тобто у 2,78 рази повільніше.

Розглянемо тепер структуру регулятора швид-

кості АНПА зі стабілізацією упору його РКП. Робота АНПА у маневрових режимах, зазвичай, протікає у косому потоці води, що набігає на РКП. Відомо, що у таких режимах упор РКП суттєво змінюється [15]. Для врахування цієї властивості у роботі засобами математичного

моделювання проведено дослідження гідродинамічних параметрів відповідних РКП, що працюють у косому потоці. Встановлено, що для гребного гвинта в напрямній насадці властиво зростання упору РКП при відхиленні потоку від вісі ГГ, рис. 8.

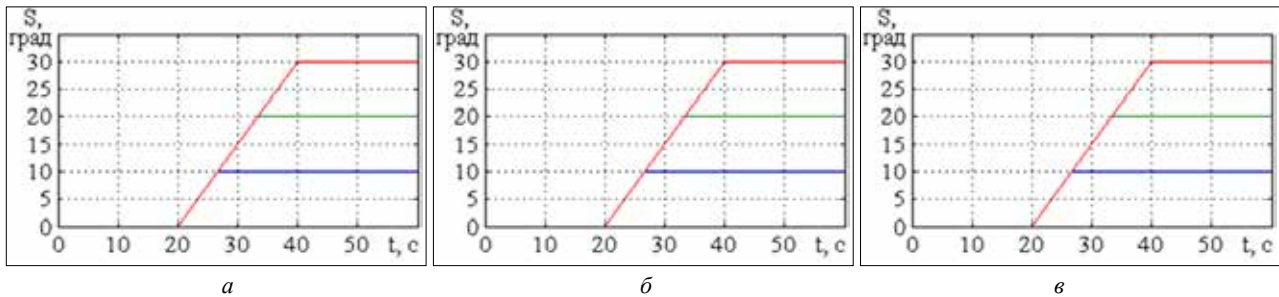


Рис. 8. Дослідження залежності упору РКП від кута набігання потоку:

а – кут набігання потоку на РКП; б – сила упору РКП в косому потоці,  $n = 30$  об/с; в – сила упору РКП в косому потоці,  $n = 60$  об/с

З метою врахування даного відхилення в структурі регулятора швидкістю руху АНПА, проведено детальне дослідження залежності упору гребного гвинта в напрямній насадці від кута набігання потоку в діапазоні кутів від 0 до 30 градусів при різних обертах гребного гвинта. Засобами CFD моделювання отримано вибірку даних, що у векторній формі описує залежність упору РКП від кута та швидкості набігання потоку. У результаті апроксимації цієї вибірки отримано функцію від двох змінних  $F_x = f(\delta^\circ, V)$ .

Відомо [12], що головною особливістю РКП з гребним гвинтом у поворотній насадці є залежність коефіцієнту упору РКП від кута перекидки насадки  $\delta$ . На рис. 9 представлено дослідження впливу кута перекидки насадки на упор РКП при заданих обертах ГГ. З представлених графіків видно, що зі збільшенням кута перекидки насадки (рис. 9, а) момент на валу ГГ зростає (рис. 9, б), упор рушійного РКП зменшується (рис. 9, в).

Для визначення закону керування в регуляторі стабілізації швидкості руху АНПА проведено

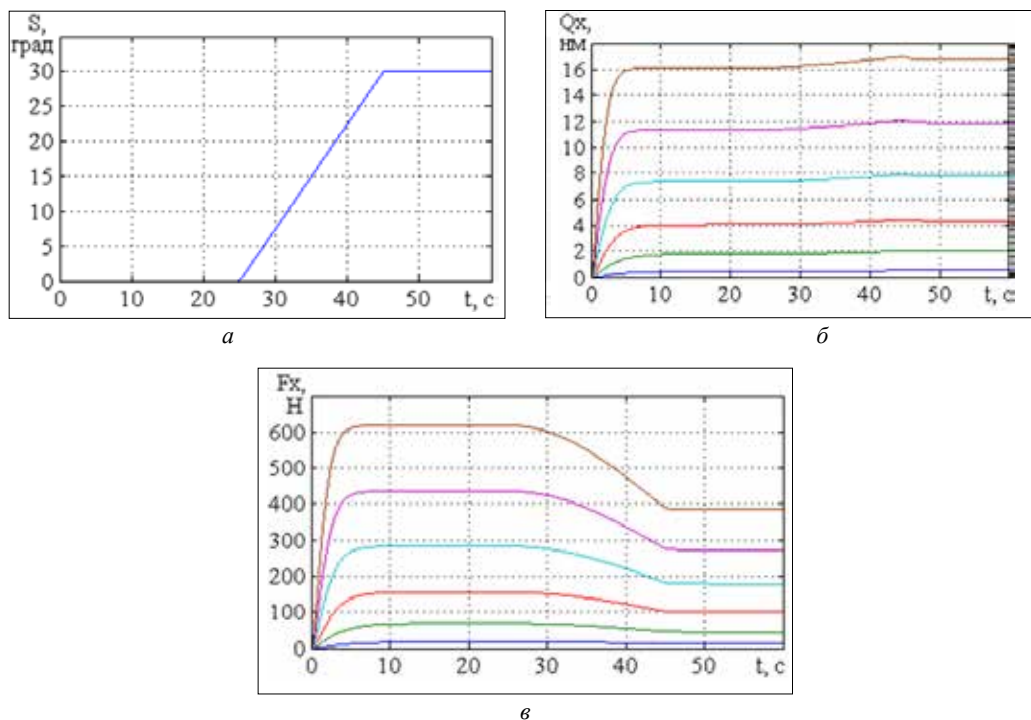


Рис. 9. Дослідження залежності упору РКП від кута перекидки насадки:

а – кут перекидки насадки; б – момент на валу ГГ; в – упор РКП

детальне дослідження залежності упору РКП від кута перекладки насадки. Засобами CFD-моделювання отримано вибірку даних, яка у векторній формі описує залежність упору РКП від кута перекладки насадки та швидкості набігання потоку. Шляхом апроксимації даної вибірки отримано функцію від двох змінних  $F_x = f(\delta^\circ, V)$ .

На рис. 10. представлено діаграму залежності упору РКП від кута повороту насадки  $\delta$  в діапазоні швидкостей  $[0, 2 \dots 1]$  м/с [16].

За отриманими функціями визначено похибку сили упору від кута та швидкості потоку. Далі, регулятор швидкості визначає значення поправки керуючого сигналу відповідно до заданої швидкості та значення похибки.

Побудову регулятора швидкості з уточненим значенням упору РКП пропонується виконати на основі структури, зображеної на рис. 11.

Регулятор побудовано на базі штучної нейронної мережі (ШНМ), оскільки для визначення похибки сили упору необхідно апроксимувати функцію від двох змінних.

В даному випадку ШНМ навчається за функцією, яка відповідає обраному типу РКП. Це може бути «ГГ – руль», «ГГ в поворотній насадці» або «поворотна колонка з ГГ в напрямній насадці». САК швидкістю руху АНПА з ГГ в поворотній насадці складається з оптимального за швидкістю регулятора швидкості АНПА та регулятора стабілізації упору РКП (рис. 12).

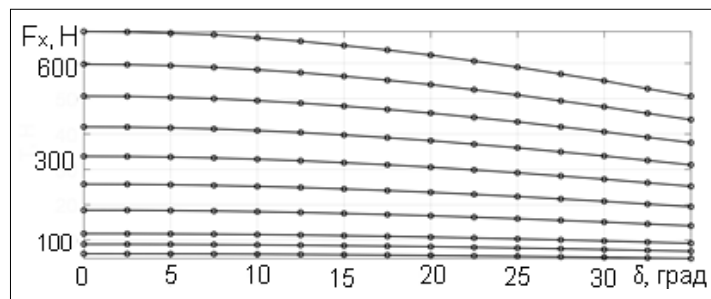


Рис. 10. Упор гребного гвинта в поворотній насадці:  $F_x = f(\delta^\circ, v)$

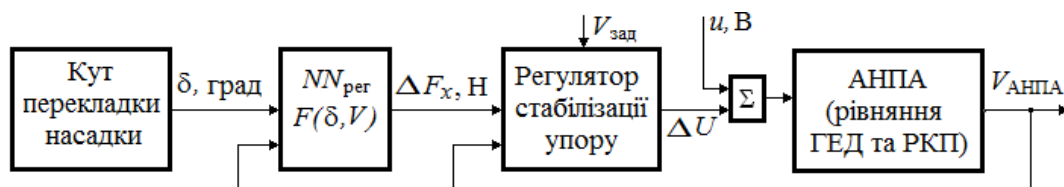


Рис. 11. Структура регулятора стабілізації упору РКП

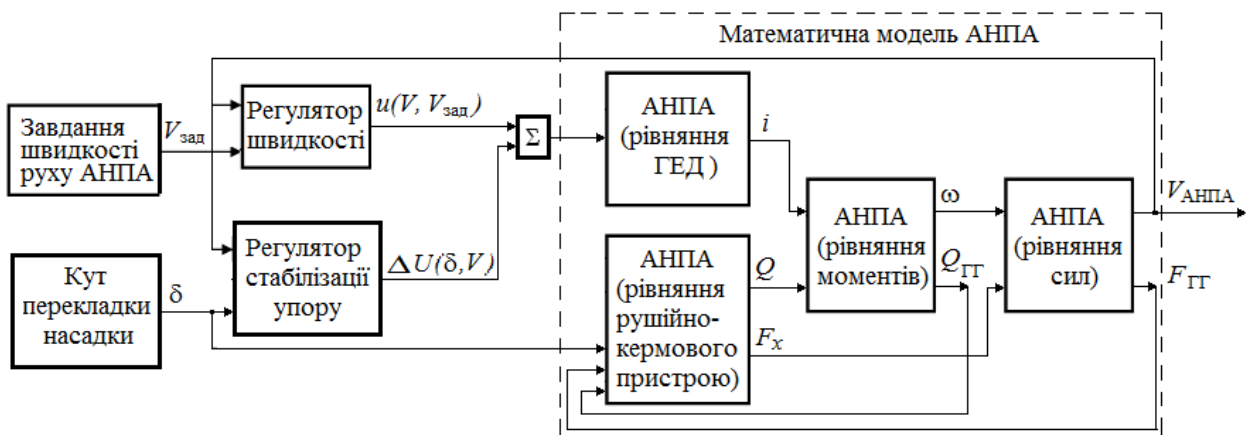


Рис. 12. Структурна схема системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА з стабілізацією упору РКП

Структурна схема містить наступні блоки: блок завдання необхідної швидкості та кута перекладки насадки; оптимальний регулятора швидкості з ШНМ, що визначає час перемикання сигналу для релейного закону керування; регулятор стабілізації упору з застосуванням ШНМ, що визначає похибку для корекції керуючого впливу; математичні моделі АНПА та РКП.

На вхід системи керування надходять дані про задану та поточну швидкості руху АНПА, а також про заданий та поточний кут перекладки насадки. Регулятор швидкості максимально швидко розганяє апарат до заданої оператором швидкості та підтримує її. Коли надходить сигнал про зміну кута перекладки насадки, регулятор стабілізації упору обчислює значення корекції керуючого впливу, рис. 13.

Спочатку АНПА починає розгін від нульової швидкості до 0,8 м/с (графік *a*, до 20-ї секунди).

Регулятор швидкості формує керуючий вплив, який дозволяє досягти заданої швидкості максимально швидко (графік *б*, до 20-ї секунди). При цьому маємо максимальне значення упору (графік *в*, до 20-ї с.). При повороті насадки на кут 30°, упор зменшується і швидкість АНПА починають знижуватись (графіки *в* і *г*, після 20-ї секунди). Регулятор стабілізації упору обчислює величину,

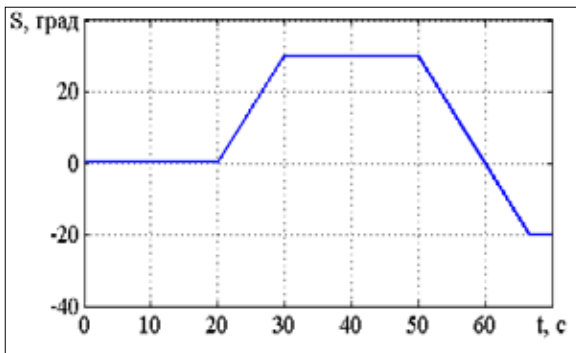
на яку необхідно збільшити керуючий вплив і компенсувати втрачений упор (графік *б*, після 20-ї секунди).

Далі на ділянці з 30 по 50 секунду апарат рухається з постійною швидкістю. Починаючи з 50 секунди кут змінюється на протилежний відносно осі ГГ,  $\delta = -20^\circ$ . При цьому, при зменшенні кута регулятор автоматично перераховує значення сигналу керування (*б*).

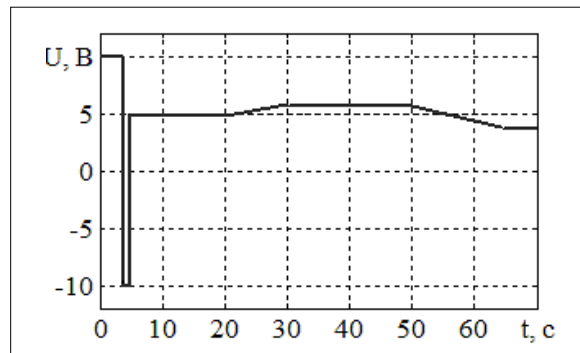
На графіках *в* та *г* представлено порівняльний аналіз упору РКП та швидкості руху АНПА при роботі САК з регулятором стабілізації упору і без регулятора: F1 – упор РКП та швидкість руху АНПА без регулятора упору ( $V_{АНПА} = 0,8$  м/с); F2 – упор РКП і швидкість руху АНПА з регулятором упору; F3 – упор РКП та швидкість руху АНПА при куті повороту насадки  $\delta = 0$ .

В табл. 1 представлено результати моделювання для режимів представлених на рис. 15 режимів роботи РКП.

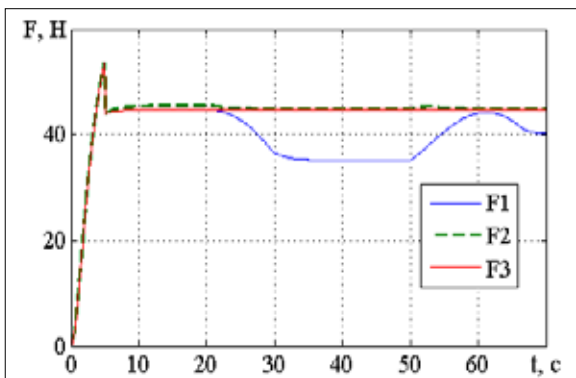
Як видно з графіків, розроблений регулятор якісно компенсує втрату упору РКП при повороті насадки. Перевага розробленого регулятора полягає в тому, що системі не потрібно відпрацьовувати похибку, що призводить до відхилення від траєкторії руху.



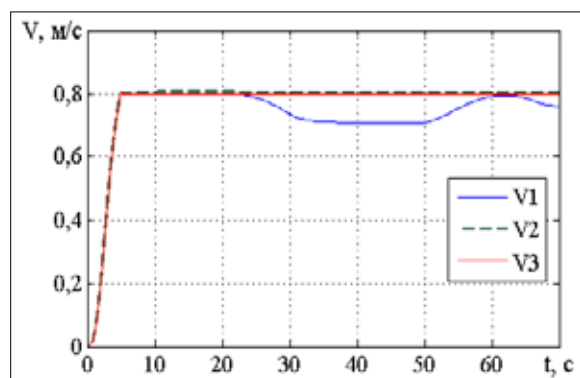
а) кут перекладки насадки



б) сигнал керування



в) упор РКП



г) швидкість руху АНПА

Рис. 13. Результат моделювання роботи оптимального регулятора швидкості з стабілізацією упору РКП



Таблиця 1  
Результати моделювання роботи САК

Кут переключки насадки $\delta$ , град	Швидкість руху $V_{АНПА}$ , м/с	Упор РКП $F_x$ , Н	
		без регулятора	з регулятором
0°	0,8	44,8 (F3)	44,8 (F3)
30°		32,28 (F1)	43,90 (F2)
Різниця, %		27	2
0	3,0	71,01	71,01
30		32,8	69,4
Різниця, %		53,8	2,2

Розроблена САК працює на упередження можливого відхилення, регулятор миттєво корегує значення сигналу керування.

#### Висновки.

Удосконалено структуру системи автоматичного керування швидкістю руху автономного ненаселеного підводного апарата, рушійно-кермовий пристрій якого функціонує у скошеному потоці води, що набігає.

Розроблено структуру системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА, яка містить оптимальний за швидкодією регулятор швидкості та регулятор стабілізації упору РКП при роботі у косому потоці води.

В структуру регулятора швидкості закладено штучну нейронну мережу для апроксимації нелінійної функції від двох змінних – початкової та

кінцевої швидкості руху АНПА, і визначення моменту перемикання керуючого сигналу.

За результатами моделювання розробленого оптимального за швидкодією регулятора швидкості визначено, що регулятор розганяє апарат без перерегулювання в 2,7 рази швидше, ніж класичний ПД-регулятор.

Розроблену САК удосконалено додаванням регулятора стабілізації упору РКП при роботі в косому потоці води. За результатами гідродинамічних досліджень функціонування гребного гвинта в напрямній та поворотній насадках при різних режимах роботи сформовано базу даних, яка описує функціональну залежність упору рушійно-кермового пристрою від кута та швидкості потоку, що набігає. Таким чином, під час повороту насадки регулятор визначає уточнене значення керуючого сигналу, враховуючи похибку упору РКП.

Шляхом математичного моделювання встановлено, що відхилення упору РКП при куті переключки насадки  $\delta=30^\circ$  залежить від швидкості потоку та може перевищувати 50%. Відхилення упору при роботі САК становить близько 2%. Таке незначне відхилення упору РКП майже не впливає на швидкість руху АНПА. Розроблений регулятор дозволяє компенсувати втрату упору рушійя, без відпрацювання помилки, що підвищує точність роботи системи автоматичного керування швидкості руху АНПА.

#### Список літератури:

1. Chuanfeng Wang, Fumin Zhang, & Dirk Schaefer. Dynamic modeling of an autonomous underwater vehicle. *Journal of Marine Science and Technology*. 2015. № 20 (2). P. 199–212. DOI: 10.1007/s00773-014-0259-0.
2. Jebelli A., Yagoub MCE, & Dhillon B. S. Modeling of an Autonomous Underwater Robot with Rotating Thrusters. *Advances in Robotics & Automation*. 2017. Vol 6, 162. DOI: 10.4172/2168-9695.1000162
3. Y. Valeriano-Medina A., Martínez L., Hernández H., Sahli Y., Rodríguez, & J. R. Cañizares.. Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data. *Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2013. № 19(2). P. 175–200. DOI: doi.org/10.1080/13873954.2012.717226.
4. Osama Hassanein Sreenatha, G. Anavatti Hyungbo, & Shim Tapabrata Ray. Model-based adaptive control system for autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*. 2016. Vol 127, P. 58–69. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.09.034
5. Timothy Sands and Kevin Bollino. Autonomous Underwater Vehicle Guidance, Navigation, and Control. 2018. P. 1–30. DOI: 10.5772/intechopen.80316
6. İkbāl Eski and Şahin Yildirim.. Control of Autonomous Underwater Vehicles using Neural Network Based Robust Control System. *International Journal of Mechanical Engineering*. 2016. Vol 1. P. 49–54. URL: https://www.iaras.org/iaras/filedownloads/ijme/2016/012-0009.pdf
7. Ivan Masmitja, Julian Gonzalez, Cesar Galarza, Spartacus Gomariz, Jacopo Aguzzi & Joaquin del Rio. New Vectorial Propulsion System and Trajectory Control Designs for Improved AUV Mission Autonomy. *Sensors*. 2018. Vol. 18, № 4, 1241. P. 1–26. DOI:10.3390/s18041241
8. Блінцов С.В. Теоретичні основи автоматичного керування автономними підводними апаратами. Миколаїв : НУК, 2014. 222 с.
9. Справочник по теории корабля: В 3-х т. / под ред. Я.И. Войткунского. Л. : Судостроение: Управление водозмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. 1985. Т. 3. 544 с.

10. Hrudinina H. S. Mathematical modeling of an autonomous uninhabited underwater vehicle dynamics with propeller in the rotary nozzle. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*. 2018. № 2(10). P. 144–153. DOI: 10.15589/SMI. <http://smi.nuos.mk.ua/-archive/2018/2/16.pdf>
11. Бажанкин Ю.В. Математическое моделирование работы винтового движителя при маневрировании судна : автореф. дисс. ... кандидата технических наук : 05.22.19. Нижний Новгород, 2012. 24 с.
12. Юдин Ю.И. Математическое моделирование работы поворотной винтовой колонки бурового судна. *Вестник МГТУ*. 2010. Том 13. № 4/2. С. 845–851.
13. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. Киев: Высшая школа. 1989. 431 с.
14. Блінцов С.В., Грудініна Г.С. Розробка оптимальних за швидкістю систем керування підводним апаратом в умовах невизначеності на базі штучних нейронних мереж. *Вісник НУК*. 2009. № 1. URI: <http://eir.nuos.edu.ua/xmlui/handle/123456789/1720>
15. Бражко А.С., Король Ю.М. Исследование взаимодействия движителей с корпусом подводного аппарата при маневрировании. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв : НУК, 2013. С. 402–405.
16. V. Blintsov, H. Hrudinina.. Mathematical modeling of autonomous underwater vehicle propulsion and steering complex operation in oblique (beveled) water flow. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 4/9 (100). P. 10–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.176673

**Blintsov V.S., Hrudinina H.S., Burunina Z.Yu., Nadtochy A.V. IMPROVEMENT OF THE SYSTEM OF AUTOMATIC SPEED CONTROL OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE**

*The structure of the system of automatic speed control of an autonomous underwater vehicle, the propulsion and steering device of which operates in a sloping flow of incoming water, has been improved. To achieve maximum speed when switching from one speed of an autonomous underwater vehicle to any other specified speed, it is proposed to use optimal control with switching control influence according to the relay law. The automatic control system includes a controller that calculates the value and switching time of the control signal in real time. The controller is built on the basis of an artificial neural network, which approximates the function of the switching time from the initial and set speed of the submarine. An artificial neural network training database was obtained by computer experiment using a mathematical model of an autonomous underwater vehicle. To stabilize the speed of the underwater vehicle during shunting movement or during the influence of the current, a regulator has been developed that adjusts the value of the control signal in accordance with the change in the stop of its propulsion and steering device. To establish the dependence of the total thrust of the propulsion and steering device used for autonomous underwater vehicles mini and small class, used experimental data obtained by mathematical modeling of the dynamics of the submarine in the Simulink Matlab system. The study of the hydrodynamic characteristics of the propeller of the propulsion and steering device, located in the guide and swivel nozzles, was carried out by the methods of computational hydrodynamics and using the software package FlowVision CFD. It is established that the deviation of the propulsion and steering device stop at the nozzle transfer angle 30° depends on the flow velocity and can exceed 50 percent. Deviation of an emphasis at work of the automatic control system makes about 2 percent. Such a slight deviation of the stop of the propulsion device almost does not affect the speed of the autonomous underwater vehicle. The developed regulator allows to compensate for the loss of the propulsion stop, without testing the error, which increases the accuracy of the automatic speed control system of autonomous underwater vehicle.*

**Key words:** autonomous underwater vehicle, propulsion and steering device, automatic control.