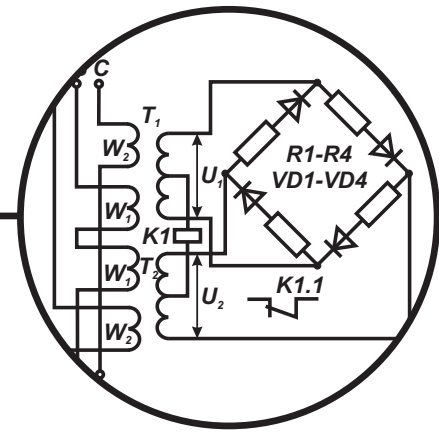




DOI 10.15589/jnn20170407  
УДК 681.52:629.5  
Б69

## MATHEMATICAL SIMULATION OF THE DYNAMICS OF AN AUTONOMOUS UNDERWATERVEHICLE WITH FLAT CIRCULATION

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ АВТОНОМНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА НА ПЛОСКІЙ ЦИРКУЛЯЦІЇ

**Serhii V. Blintsov**  
sergiy.blintsov@nuos.edu.ua  
ORCID: 0000-0001-5706-2200

**Hanna S. Hrudinina**  
hanna.hrudinina@nuos.edu.ua  
ORCID: 0000-0001-8298-9251

**Leo Tosin Aloba**  
aloba.leo.tosin@nuos.edu.ua  
ORCID: 0000-0002-0509-8129

**С. В. Блінцов,**  
канд. техн. наук, доц.

**Г. С. Грудініна,**  
викл.

**Л. Т. Алоба,**  
асп.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

**Abstract.** The article presents the development of a mathematical model of the functioning of the «screw — stern» propulsion and stern complex of the AUV for the study of its power characteristics with consideration to its flat circulation in the horizontal plane. The AUV simulation has been performed with the help of the Simulink system of MATLAB. In the course of the study, it has been established that the propeller thrust has a nonlinear dependence on the angle of the water flow. The developed mathematical model makes it possible to specify the necessary parameters for the development of high-quality systems of automatic control for the propulsion and stern complexes of the AUV.

**Keywords:** mathematical simulation; autonomous underwater vehicle; propulsion complex «screw — stern».

**Анотація.** Представлено розробку математичної моделі функціонування рушійно-стернового комплексу АПА типу «гвинт-стерно» для дослідження його силових характеристик на плоскій циркуляції в горизонтальній площині. Моделювання руху АПА проводилось в системі Simulink середовища MATLAB. Під час досліджень встановлено, що сила упору гребного гвинта має нелінійну залежність від кута потоку води, що набігає, який змінюється залежно від кута перекладки стерна. З'ясовано також, що сила упору має нелінійну залежність від швидкості руху АПА. Розроблена математична модель дає змогу уточнити необхідні параметри для розробки високоякісних систем автоматичного керування рушійно-стерновими комплексами АПА, які мають забезпечити траєкторний рух підводних апаратів із заданою точністю в горизонтальній площині.

**Ключові слова:** математичне моделювання; автономний підводний апарат; рушійно-стерновий комплекс «гвинт-стерно».

**Аннотация.** Представлена разработка математической модели функционирования движительно-рулевого комплекса АПА типа «винт-руль» для исследования его силовых характеристик на плоской циркуляции в горизонтальной плоскости. Моделирование движения АПА проводилось в системе Simulink среды MATLAB. Во время исследований установлено, что сила упора гребного винта имеет нелинейную зависимость от угла набегающего потока воды, который изменяется в зависимости от угла перекладки руля. Выяснено также, что сила упора имеет нелинейную зависимость от скорости движения АПА. Разработанная математическая модель позволяет уточнить необходимые параметры для разработки высококачественных систем автоматического управления движительно-рулевыми комплексами АПА, которые должны обеспечить траекторное движение подводных аппаратов с заданной точностью в горизонтальной плоскости.

**Ключевые слова:** математическое моделирование; автономный подводный аппарат; движительно-рулевой комплекс «винт-руль».

## REFERENCES

- [1] Antonenko S. V. *Sudovye dvizhiteli* [Ship propulsors]. Vladivostok, DVGUTU Publ., 2007. 126 p.
- [2] Yudin Yu. I. *Matematicheskoe modelirovanie raboty povorotnoy vintovoy kolonki burovogo sudna pri ego proizvolnom dvizhenii* [Mathematical simulation of the operation of a rotary screw column of a drill ship at its arbitrary movement]. *Vestnik MGTU — Proceedings of the MSTU*. Moscow, MGTU Publ., 2010, vol. 13, no. 4/2, pp. 845–851.
- [3] Kiselev L. V., Yudakov A. A. *Dinamika podvodnogo robota pri traektornom obsledovanii obektov* [Dynamics of the underwater robot in trajectory survey of objects]. *Podvodnye roboty i ikh sistemy — Underwater robots and their systems*. Vladivostok, 1992, issue 5, pp. 28–50.
- [4] Blintsov S. V. *Teoretychni osnovy avtomatichnogo keruvannya avtonomnykh podvodnykh aparatamy* [Theoretical foundations of automatic control of autonomous underwater vehicles]. Mykolaiv, NUOS Publ., 2014. 222 p.
- [5] Brazhko A. S., Korol Yu. M. *Modelirovanie raboty grebnogo vinta v nasadke v kosom nabegayushchem potoke* [Modeling of the operation of the propeller in the nozzle in an oblique oncoming flow]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUOS*, 2013, no 1, pp. 25–32.
- [6] Veltishchev V. V., Gladkova O. I. *Issledovanie vzaimovliyaniya konturov upravleniya ANPA «Imperator» s ucheton osobennostey organizatsii ego dvizhitelno-rulevogo kompleksa* [Study of the mutual influence of the control contours of the UUV “Imperator” with consideration to the peculiarities of organization of its propulsion and steering complex]. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii Vestnik — Scientific and technical bulletin for young scientists*. Moscow, MGTU Publ., no. FS77-51038. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/724988.html>.
- [7] Voytkunskiy Ya. I. *Spravochnik po teorii korablya* [Reference book of ship theory]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. 768 p.
- [8] Slizhevskiy N. B., Korol Yu. M., Sokolik M. G. *Gidrodinamicheskiy raschet samokhodnykh podvodnykh apparatov* [Hydrodynamic calculation of self-propelled underwater vehicles]. Mykolaiv, UGMTU Publ., 2000. 93 p.
- [9] Slizhevskiy N. B. *Khodkost i upravlyaemost podvodnykh tekhnicheskikh sredstv* [Propulsion qualities and controllability of underwater technical facilities]. Mykolaiv, UGMTU Publ., 1998. 148 p.
- [10] Bazhankin Yu. V. *Analiz vzaimodeystviya grebnogo vinta s rulevym organom sudna* [Analysis of the interaction of the propeller with the ship steering gear]. *Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta — Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*, 2011, no. 29, pp. 11–15.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Розвиток підводної робототехніки на цей час характеризується проектуванням, будівництвом та впровадженням у морську практику високоефективних автоматично керованих засобів морської робототехніки нового покоління — ненаселених підводних апаратів (АНПА) з істотно розширеними функціональними можливостями й високими показниками якості керування. Такі апарати здатні виконувати широкий спектр підводно-технічних робіт в автоматичному режимі в умовах повної або часткової невідомості, а також виконувати складні пошукові та обстежувальні роботи з одночасним використанням декількох спільно діючих АНПА.

Реалізація таких засобів підводної техніки вимагає створення високоякісних систем керування рушійно-стерновими комплексами АНПА, які мають забезпечити траєкторний рух підводних апаратів із заданою точністю.

Рушійно-стерновий комплекс (РСК) АНПА як об'єкт керування є суттєво нелінійним, характеристики якого залежать від швидкості й кута потоку води, що набігає [1]. Маневрові режими АНПА (рух за заданою криволінійною траєкторією, аварійні зміни курсу тощо)

є типовими режимами для сучасних АНПА, тому вивчення зміни силових характеристик РСК в таких режимах є актуальним прикладним науковим завданням.

Математичне моделювання є важливим інструментом як для дослідження зміни силових характеристик РСК у ході маневрування АНПА, так і для синтезу елементів систем автоматичного керування, у складі яких передбачається застосування математичних моделей АНПА як об'єкта керування.

Реалізація високоефективних систем автоматичного керування маневровим рухом АНПА дасть змогу забезпечити ефективне рішення в автоматичному режимі багатьох завдань безперервного моніторингу підводних комунікацій, стану навіколишнього середовища навколо нафто- і газодобувних платформ, а також виконання завдань, пов'язаних з пошуково-рятувальними морськими операціями та виявленням і розробкою корисних копалин і проведенням підводних наукових досліджень (океанографічних, археологічних тощо).

АНАЛІЗ ОСТАННІХ  
ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз сучасних вітчизняних і зарубіжних наукових публікацій свідчить, що високоточне керування

автономними підводними апаратами можливе за умов достовірного математичного моделювання основного виконавчого механізму керування, а саме рушійно-стернового комплексу, який може складатись з гвинта чи гвинта в насадці й горизонтального або вертикального стерна й поворотної колонки [1]. Багато уваги приділяється математичному моделюванню роботи РСК — поворотна колонка, що береться як головний рушій для бурових суден і платформ [2, 3]. Однак АНПА суттєво відрізняються за призначенням і функціональними можливостями й потребують безперервного вдосконалення наявних систем керування. Автором [4] розроблено математичну модель руху АНПА з вертикальним рушієм. Дана модель реалізована в системі Simulink середовища Matlab і надає можливість досліджувати вплив зовнішнього збурення на роботу системи автоматичного керування (САК). Гребний гвинт (ГГ) дає змогу змінювати швидкість у широких межах і має високий коефіцієнт корисної дії. Під час варіації частоти обертання ГГ змінюється сила тяги гвинта. Причому даний параметр носить досить нелінійний характер. Сила тяги ГГ  $T$  уздовж осі вала, а також момент  $Q$  на валу визначаються за формулами:

$$T = \rho D^4 \left( \frac{\omega}{2\pi} \right)^2 \int_{r_H/R}^1 \frac{Z}{4} C_y \left( \frac{b}{D} \right) \left( \frac{2\pi v_R}{D\omega} \right)^2 \times \\ \times \left( \frac{2\pi v_R}{D\omega} \right)^2 \cos \beta_I (1 - \varepsilon \tan \beta_I) d \left( \frac{r}{R} \right); \\ Q = \rho D^5 \left( \frac{\omega}{2\pi} \right)^2 \int_{r_H/R}^1 \frac{Z}{8} C_y \left( \frac{b}{D} \right) \left( \frac{r}{R} \right) \times \\ \times \left( \frac{2\pi v_R}{D\omega} \right)^2 \sin \beta_I (1 - \varepsilon \tan \beta_I) d \left( \frac{r}{R} \right).$$

Інтеграли в наведених формулах мають назву коефіцієнт упору гвинта  $K_T$  і коефіцієнт моменту гвинта  $K_Q$  відповідно. У [4] дані коефіцієнти представлені у вигляді кривих дії ГГ й характеризують упор і момент при різних режимах роботи гвинта:  $T = K_T \rho D^4 \frac{\omega^2}{4\pi^2}$ ;  $Q = K_Q \rho D^5 \frac{\omega^2}{4\pi^2}$ , де  $\rho$  — питома густина води;  $\omega$  — кутова швидкість обертання;  $D$  — діаметр гвинта.

Однак слід зазначити, що під час поєднання роботи ГГ й стерна, РСК починає працювати в скошеному набігаючому потоці, при цьому значення сили тяги й моменту на валу також змінюються.

Також автори [5, 6] звертають увагу на виникнення значної нелінійності керованих параметрів за умови відхилення РСК на певний кут від співвісного потоку й вказують на необхідність детального дослідження зміни упору пропульсивного комплексу в кожному потоці.

Оскільки великий клас АНПА має основним режимом роботи — маневровий, у якому ГГ працює в умовах скошеного потоку, то завдання дослідження роботи РСК у даних умовах є досить актуальним питанням.

**МЕТА РОБОТИ** — розробка математичної моделі функціонування рушійно-стернового комплексу АНПА типу «гвинт-стерно» в скошеному потоці води, що набігає, та дослідження в системі Simulink зміни його силових характеристик на плоскій циркуляції АНПА в горизонтальній площині.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

**Загальна характеристика об'єкта дослідження.** Для моделювання руху АНПА і дослідження створюваних систем використовується система Simulink середовища MATLAB 2010a. Створено Simulink-модель, що імітує рух АНПА в горизонтальній площині й імітує роботу РСК «гвинт — стерно».

Об'єкт керування в режимі горизонтального руху розглядаємо як тверде тіло (корпус АНПА), що переміщується під дією упору горизонтального рушія, приводом якого є гребний електродвигун постійного струму незалежного збудження. Керування здійснюється шляхом прикладання до якоря двигуна відповідної напруги живлення  $U = K_u u$ , де  $K_u$  — коефіцієнт підсилення джерела напруги,  $u$  — необхідне значення напруги.

Математична модель об'єкта керування буде мати вигляд [4]:

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

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

$$(m_{\text{ПА}} + \lambda_x) \frac{dV_x}{dt} = T - F_x - F_{Dx} = \\ = \frac{K_T \rho D^4}{4\pi^2} \omega^2 - \frac{\rho C_x \Omega}{2} V_x^2 - F_{Dx}; \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = V_x, \quad (4)$$

де  $i$  — миттєве значення електричного струму якоря електродвигуна;  $u_x$ ,  $K_u$  — керуючий сигнал регулятора напруги та його коефіцієнт підсилення відповідно;  $L$ ,  $r_a$ ,  $c$ ,  $\Phi$  — електромагнітні параметри електродвигуна;  $\omega$  — частота обертання ГГ;  $k_p$  — 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 ГГ;  $K_Q$  — безрозмірний нелінійний коефіцієнт, що характеризує момент гребного гвинта;  $\rho$  — питома густина води;  $D$  — діаметр ГГ;  $m_{\text{ПА}}$ ,  $\lambda_x$  — 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) ГГ;  $K_T$  — безрозмірний нелінійний коефіцієнт, що характеризує упор ГГ;  $F_x = \rho C_x \Omega V_x^2 / 2$  — сила опору води руху ПА;  $C_x$  — гідродинамічний коефіцієнт корпусу ПА по осі  $x$ ;  $\Omega$  — площа змоченої поверхні зовнішнього корпусу ПА;  $F_{Dx}$  — сила зовнішнього збурення по осі  $x$ .

Для розрахунку гідродинамічних сил і моментів, що з'являються на корпусі АНПА внаслідок його руху щодо навколишнього середовища, використовувались відомі формули з [7, 8].

**Математична модель роботи РСК «гвинт — стерно».** Розглянемо систему «відкритий гвинт — стерно». У процесі перекидання стерна від нульового положення на кут  $\delta_r$  симетричність його обтікання потоком рушія порушується, що призводить до появи складової швидкості потоку  $\vec{U}_r$ , усереднений напрям якої може бути прийнято перпендикулярним до площини хорди стерна. У результаті вісь потоку гвинта, згідно з постулату Жуковського — Чаплигіна і рівнянням:

$$\vec{U}_\delta = \vec{U} - \vec{U}_r \quad (5)$$

відхиляється від осі гребного валу в той самий бік, що й стерно, на кут  $\delta_r$ . При цьому упор гвинта  $\vec{P}$  (рис. 1) розпадається на дві складові: реакцію відхиленого потоку  $\vec{P}_\delta$  й додаткову реакцію  $\vec{R}_\delta$ , що виникає в результаті натікання частини потоку на відхилене стерно [9].

Застосування векторної форми закону збереження кількості руху до рівності (5) дозволяє отримати такий результат:

$$\vec{P}_\delta = \vec{P} - \vec{R}_\delta. \quad (6)$$

Відзначено, що на стерні виникає сила  $R_r$ , яка дорівнює величині  $R_\delta$ , але протилежно спрямована:

$$\vec{R}_r = -\vec{R}_\delta. \quad (7)$$

Проектування рівності (6) і (7) на поздовжню й поперечну площини перерізу АНПА щодо осі ГГ дає можливість отримати вирази для поздовжньої й поперечної складових сили  $P_\delta$  [9]:

$$P_x = P_\delta \cos \delta_r = P(1 - \sin^2 \delta_r), \quad (8)$$

$$P_y = P_\delta \sin \delta_r = P \sin \delta_r \cos \delta_r. \quad (9)$$

Таким чином, після перекидання стерна, розташованого в потоці рушія, на певний кут  $\delta_r$  на кормову частину корпусу судна через конуси гребних валів будуть діяти поздовжня й поперечна складові сили, що розвивається рушієм, а гребний вал при цьому буде сприймати додаткове зусилля:

$$Q_x = P \theta_r \sin^2 \delta_r, \quad (10)$$

де  $\theta_r = F_\delta / F_p$  — коефіцієнт, що враховує відношення площі диска гвинта, який перекривається стерном за гіпотетичної перекидки останнього на  $90^\circ$ , до всієї площі диска.

Тому крутний момент на валу ГГ дорівнює [9]:

$$M_{дв} = M_c (1 + \theta_r \sin^2 \delta_r). \quad (11)$$

У результаті, враховуючи (8), (9) та (11), у системі Simulink розроблено математичну модель АНПА, що рухається в горизонтальній площині, з РСК «гвинт — стерно».

**Короткий опис структурних блоків моделі.** Модель складається з двох (основних) блоків (рис. 2). Перший блок — «AUV model» моделює рух АНПА в горизонтальній площині з РСК, розташованим на одній осі з центром тяжіння апарата.

Другий блок «Tsigma» імітує роботу РСК «гвинт — стерно» за умови руху АНПА в горизонтальній площині з перекидкою стерна від  $0$  до  $90^\circ$ , швидкості від  $0$  до  $1$  м/с. Дана система дозволяє моделювати динаміку автономного підводного апарата на плоскій циркуляції.

Перший блок (рис. 3) складається з чотирьох головних частин. Перші три — «Equation1», «Equation 2», «Equation 3» — реалізують у рекурентній формі математичні рівняння АНПА, кожен з них виконує конкретну функцію.

Функція перша — рекурентна форма рівняння (1):

$$((K_u \cdot u(1) - r_a \cdot u(3) - (c\Phi / k_p) \cdot u(2)) \cdot \Delta t + u(3),$$

де на вході:  $u$  — керуючий вплив;  $\omega$  — частота обертання ГГ; на виході  $i$  — миттєве значення електричного струму.

Функція друга — рекурентна форма рівняння (2):

$$((c\Phi / k_p) \cdot u(1) - u(2)) / J_{ГГ} \cdot \Delta t + u(3),$$

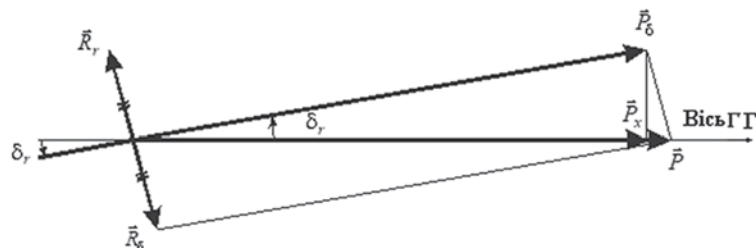


Рис. 1. Схема сил, створених рушієм при перекидці стерна

де на вході:  $i$  — миттєве значення електричного струму;  $Q$  — момент на валу; на виході:  $\omega$  — частота обертання ГГ.

Функція третя — рекурентна форма рівняння (3):

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

де на вході:  $T$  — упор ГГ;  $F_d$  — зовнішнє збурення; на виході:  $V$  — швидкість руху АНПА.

Четвертий блок, «Subsystem1» (рис. 4) призначений для встановлення необхідного коефіцієнта сили упору ГГ й моменту на валу відповідно до поточного режиму роботи апарата: прямолінійний рух або плоска циркуляція.

Блок «Tsigma» (рис. 5) імітує роботу РСК «гвинт — стерно» й реалізує рівняння (8), (9) та (11).

Головною перевагою даного блоку є те, що він визначає зміну сили упору й моменту гвинта залежно від кута набігаючого потоку в діапазоні швидкості  $[0 \dots 1]$  м/с.

Слід зауважити, що в даній моделі такі параметри, як швидкість руху й кут повороту стерна встановлюються в ручному режимі й не змінюються під час всієї ітерації.

**Моделювання динаміки АНПА на плоскій циркуляції.** На базі математичної моделі АНПА для прямолінійного руху у вертикальній площині й математичній моделі роботи РСК «гвинт — стерно» в системі Simulink розроблено модель, яка імітує рух АНПА в режимі прямолінійного руху й на плоскій циркуляції в горизонтальній площині.

Дана модель дає можливість дослідити низку параметрів у ході роботи апарата в різних режимах

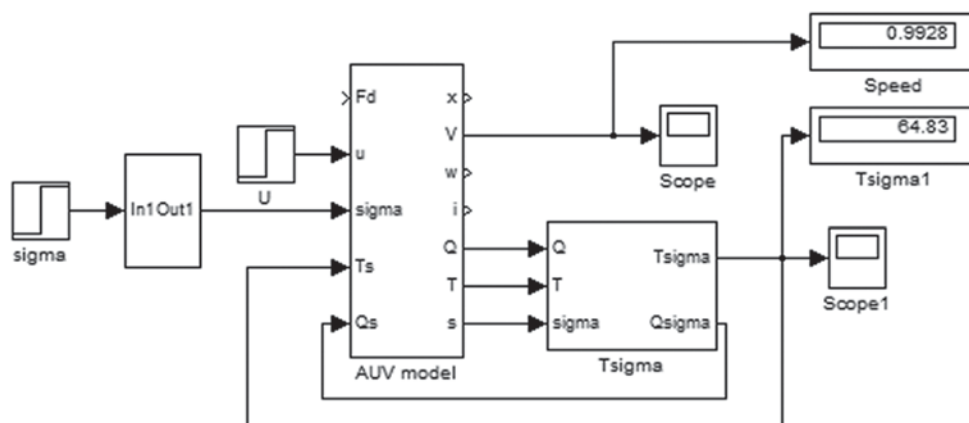


Рис. 2. Математична модель АНПА з РСК «гвинт — стерно», реалізована в системі Simulink

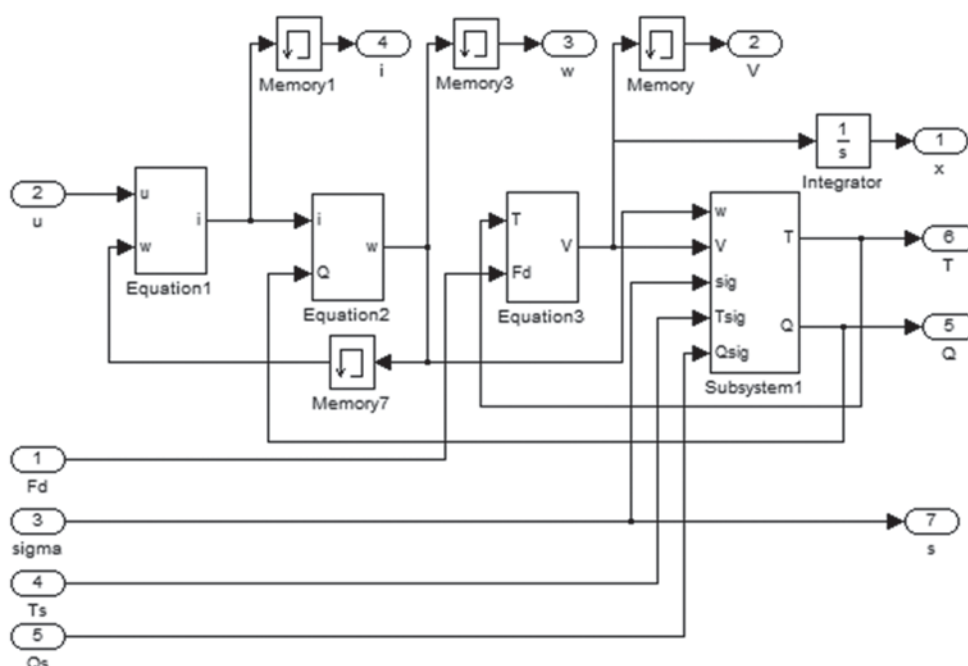


Рис. 3. Структура блоку «AUV model»



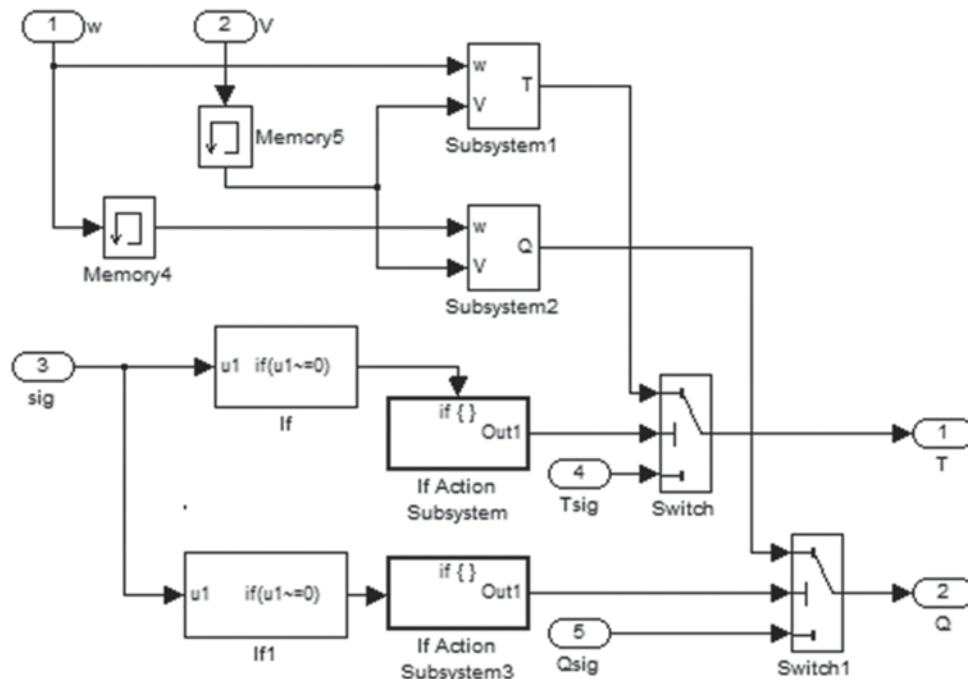


Рис. 4. Структура блоку «Subsystem1»

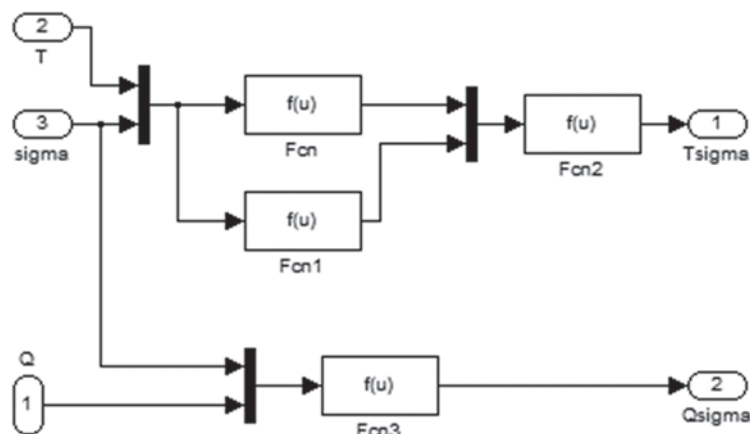


Рис. 5. Структура блоку «Tsigma»

і може бути використана під час розробки автоматичної системи керування для стабілізації руху АНПА на плоскій циркуляції.

Для перевірки працездатності розробленої математичної моделі та її Simulink-реалізації проведемо дослідження впливу скошеного потоку води, що набігає на РРК типу «гвинт-стерно», для АНПА з такими характеристиками:

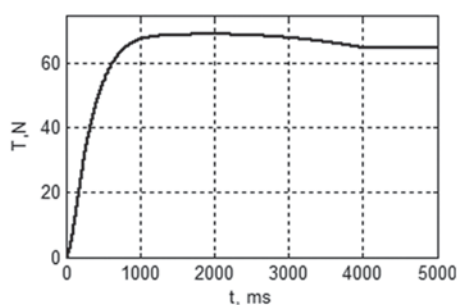
- маса — 60 кг;
- швидкість ходу — 1 м/с;
- діаметр ГГ — 160 мм;
- довжина стерна — 210 мм

На рис. 6,а зображено графічну залежність зміни сили упору ГГ від кута набігаючого потоку  $\delta = 20$  град. для такого АНПА. На рис. 6,б представле-

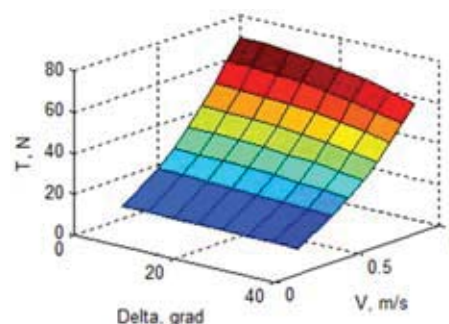
но графік функції від двох змінних: кута набігаючого потоку та швидкості  $\delta = [0...35]$  град; руху АНПА  $V = [0,2...1]$  м/с.

Комп'ютерне моделювання динаміки АНПА на плоскій циркуляції довело наявність залежності сили упору ГГ від кута набігаючого потоку. Як видно з рис. 6, дана залежність має значну нелінійність і буде впливати на точність керування АНПА за траєкторного руху, наприклад на плоскій циркуляції. Також встановлено (рис. 6, б) нелінійний характер залежності упору гвинта від кута набігаючого потоку й швидкості руху апарата в діапазоні  $[0,2...1]$  м/с.

Результати моделювання руху АНПА із середньою швидкістю 0,5 м/с подано в таблиці 1.



а)



б)

**Рис. 6.** Графічна залежність зміни сили упору ГГ:

а) від кута набігаючого потоку; б) від кута набігаючого потоку й швидкості руху АНПА

**Таблиця 1**

| Кут потоку,<br>що набігає на ГГ<br>$\delta$ , град | Швидкість руху АНПА<br>$V$ , м/с | Сила упору ГГ, Н                       |                                       |                      |
|----------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
|                                                    |                                  | при прямолінійному<br>русі Т (0, $V$ ) | на циркуляції<br>Т ( $\delta$ , $V$ ) | зниження<br>упору, % |
| 35                                                 | 0,5                              | 18,47                                  | 15,13                                 | 17,9                 |
| 20                                                 | 0,5                              | 18,47                                  | 17,36                                 | 6                    |
| 5                                                  | 0,5                              | 18,47                                  | 18,4                                  | 0,37                 |

Таким чином, встановлено суттєвий вплив зміни упору ГГ АНПА від кута, під яким на нього набігає потік води, та швидкості руху АНПА на плоскій циркуляції. Зазначений вплив необхідно враховувати в синтезі регуляторів гребних електродвигунів АНПА, які працюють у складі систем автоматичного керування плоским рухом таких підводних апаратів.

**ВИСНОВКИ.** 1. Удосконалено модель динаміки АНПА доповненням її математичної моделі рівняннями керованого капсульованого електродвигуна постійного струму паралельного збудження, внутрішній простір якого для захисту від дії зовнішнього середовища заповнюється рідким діелектриком.

2. Розроблено математичну модель функціонування рушійно-стернового комплексу АНПА типу

«гвинт—стерно» у скошеному потоці, що набігає, та досліджено в системі Simulink зміну його силових характеристик на плоскій циркуляції АНПА в горизонтальній площині.

3. З'ясовано, що упор рушійно-стернового комплексу АНПА типу «гвинт—стерно» у скошеному потоці, що набігає, є нелінійною залежністю від кута набігання потоку води й швидкості руху АНПА.

4. Отримані залежності можуть бути враховані в синтезі регуляторів систем автоматичного керування плоским маневровим рухом АНПА. Для цього необхідно провести додаткові дослідження отриманих нелінійних залежностей з метою побудови тривимірної поверхні «упор ГГ — кут перекидки стерна — швидкість потоку, що набігає» та її використання як складової регулятора упору гребного електродвигуна АНПА.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Антоненко С. В. Судовые движители [Текст] : учеб. пособие / С. В. Антоненко. — Владивосток : ДВГТУ, 2007. — 126 с.
- [2] Юдин Ю. И. Математическое моделирование работы поворотной винтовой колонки бурового судна при его произвольном движении [Текст] / Ю. И. Юдин // Вестник МГТУ. — Москва : МГТУ, 2010. — т. 13. — № 4/2. — С. 845–851.
- [3] Киселёв Л. В. Динамика подводного робота при траекторном обследовании объектов [Текст] / Л. В. Киселёв, А. А. Юдаков // Подводные роботы и их системы. — Владивосток, 1992. — Вып. № 5. — С. 28–50.
- [4] Блінцов С. В. Теоретичні основи автоматичного керування автономними підводними апаратами [Текст] : Монографія / С. В. Блінцов. — Миколаїв : НУК, 2014. — 222 с.
- [5] Бражко А. С. Моделирование работы гребного винта в насадке в косом набегающем потоке [Текст] / А. С. Бражко, Ю. М. Король. // Збірник наукових праць НУК. — 2013. — № 1. — С. 25–32.
- [6] Вельтищев В. В. Исследование взаимовлияния контуров управления АНПА «Император» с учётом особенностей организации его движительно-рулевого комплекса [Электронный журнал] / В. В. Вельтищев, О. И. Гладкова // Молодёжный научно-технический Вестник. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана. — Эл. № ФС77-51038. — Режим доступа : <http://sntbul.bmstu.ru/doc/724988.html>.
- [7] Справочник по теории корабля [Текст] / Под ред. Я. И. Войткунского. — Л. : Судостроение, 1985. — Т. 1. — 768 с.

- [8] **Слижевский Н. Б.** Гидродинамический расчет самоходных подводных аппаратов [Текст] / Н. Б. Слижевский, Ю. М. Король, М. Г. Соколик // Учебное пособие. — Николаев : УГМТУ, 2000. — 93 с.
- [9] **Слижевский Н.Б.** Ходкость и управляемость подводных технических средств [Текст] : учебное пособие / Н. Б. Слижевский. — Николаев : УГМТУ, 1998. — 148 с.
- [10] **Бажанкин Ю. В.** Анализ взаимодействия гребного винта с рулевым органом судна [Текст] / Ю. В. Бажанкин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — Вып. 29. — 2011. — С. 11–15.

---

© С. В. Блінцов, Г. С. Грудініна, Л. Т. Алоба

Надійшла до редколегії 09.11.17

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК

д-р техн. наук, проф. *В. С. Блінцов*