



## Development of Predictive Control Systems for Marine-Based Vehicles

---

Vitalii Budashko and Dmytro Filimonov

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

December 23, 2024

УДК 629.56.064.5+620.9+629.5

## РОЗВИТОК СИСТЕМ ПРОГНОЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ МОРСЬКОГО БАЗУВАННЯ

**Філімонов Д.А.** здобувач другого рівня вищої освіти  
**В.В. Будашко**, д.т.н., професор  
Національний університет «Одеська морська академія»

**Анотація:** Автоматизоване маневрування суден в стиснутих умовах зазвичай вимагають стовідсоткового резервування підрулюючих пристроїв (ПП) різних модифікацій та розташування. Ієрархія системи керування рухом (СКР) зазвичай розділена на кілька рівнів за допомогою високорівневого контролера руху та алгоритму розподілу управління двигунами ПП. Це дозволяє створити модульну конструкцію програмного забезпечення, де контролер високого рівня (КВР) можна спроектувати без використання вичерпної інформації про двигуни ПП, а питання розгалуження вхідного сигналу та обмеження швидкості обробляються СКР. Для певного набору конфігурацій ПП таке від'єднання може призвести до зниження продуктивності керування через обмеженість даних КВР щодо фізичних обмежень судна та поведінку СКР.

У статті досліджуються різні підходи до покращення продуктивності керування з використанням нелінійного прогнозованого керування моделлю (МРС) як основи для розроблених контролерів руху через його оптимізоване рішення та здатність враховувати обмеження. По-перше, реалізується відокремлена система та надаються результати для двох простих рухових завдань, що показують проблеми, пов'язані з роз'єднанням. Після цього застосовуються два різні підходи для усунення виявлених недоліків. Розроблено нелінійний контролер МРС, який поєднує контролер руху та розподілу управління двигунами ПП, що призводить до більш надійної системи керування. Потім, для збереження модульності системи керування, проводиться дослідження можливих шляхів розширення відокремленої системи для досягнення адекватної продуктивності, на кшталт комбінованих систем. Одним із запропонованих рішень є нелінійний контролер МРС із змінними в часі обмеженнями, які враховують поточні обмеження системи управління ПП, що дозволить збільшити точність управління та зменшити час відгуку системи на 10 %.

**Ключові слова:** судновий пропульсивний комплекс, прогнозне керування, підрулюючі пристрої, діагностика, диспетчер високого рівня.

## DEVELOPMENT OF PREDICTIVE CONTROL SYSTEMS FOR MARINE-BASED VEHICLES

**Filimonov D.A.** second-level graduate of higher education  
**V. Budashko** Dr. of Science, Professor  
National University "Odessa Maritime Academy"

**Abstract:** Automation of ship maneuvering in limited sailing conditions usually requires 100% redundancy of thrusters (THR) of various modifications and their locations in accordance with the matrix. The hierarchy of the motion control system is branched by levels using high-level motion controllers and THR control distribution algorithms, which allows for a modular design with software, where the high-level controller (HLC) can be designed without comprehensive information about the thruster motors, and the input signal branching and speed limits are handled by the motion controller. But, for certain THR configurations, this

*branching leads to the decrease in control efficiency due to the limitation of data on the physical characteristics of the ships and the operation of the motion controller.*

*This research examines different approaches to improving control efficiency using methods of nonlinear predictive control models as a basis for developing motion controllers with decision optimization based on relevant constraints. The implemented branched system is the result of solving two simple problems of ship's motion, which highlight the related problems. The use of different approaches to eliminate the identified shortcomings made it possible to develop the nonlinear controller that combines the motion controller with distributed control of the THR's and ensuring the certain level of system reliability. The modularity of the control system is provided by the expansion of the closed system, which made it possible to achieve an increase in efficiency during the combined mode of operation. The obtained solution of nonlinear control with time-varying constraints made it possible to increase the accuracy of the control with a decrease in the duration of the pause in response to the change of the disturbance within 10%.*

**Keywords:** *ship propulsion complex, predictive control, thrusters, diagnostics, high-level controller.*

Методологія застосування нелінійного прогнозованого управління (англ. *Model Predictive Control – MPC*) все більше використовуються як основа в системах управління рухом комбінованих пропульсивних комплексів (КПК) морських суден з підрулючими пристроями [1-3].

Основні аспекти сучасного стану розвитку нелінійного прогнозованого управління включають:

- актуальні тематичні дослідження та робочі приклади, які демонструють методи застосувати моделювання та керування дизайном щодо власних проєктів;
- репозиторій *GitHub* зі *MatLab*-сценаріями та набором інструментів відповідних інструментів, сумісним з останніми версіями програмного забезпечення від *Mathworks*;
- новий вміст математичного моделювання, включаючи моделі для суден і підводних апаратів, гідродинаміки, керуючих сил та моментів;
- нові методи орієнтації та навігації, включаючи закони навігації прямої видимості (англ. *line of sight – LOS*), сенсорні системи, навігаційні системи на основі моделей та інерційні навігаційні системи.

Судна, працюючи в режимі *DP*, для утримання позиції застосовують найбільшу кількість ПП, що призводить до перевантаження суднової електроенергетичної системи або її неефективного використання. Це відбувається, з одного боку, внаслідок забезпечення точного позиціонування, а з іншого – за рахунок надмірного резервування потужності на випадок відмови одного чи кількох ПП [4-8].

Розширюючи робочий простір традиційних *DP*-систем, наприклад, щоб включити автоматизоване швартування та постановку у док для танкерів або низьку швидкість руху пасажирських поромів, необхідно адаптувати ці системи для нового переліку суден. Ці судна, як правило, розробляються без надлишкової енергооснащеності і можуть бути не такими маневровими, на відміну від суден, що підтримують *DP*. Це означає, що система керування має краще використовувати доступну енергоефективність, забезпечуючи як вищий рівень автоматизації для широкого спектру суден, так і підвищення енергоефективності судна із системою *DP* [9-12].

Основною проблемою на сьогодні залишається забезпечення енергоефективного управління рухом судна на низькій швидкості в горизонтальній площині із використанням контролера прогнозованого управління високого рівня [13-15].

Об'єктом дослідження є транспортний засіб морського базування (ТЗМБ) із 6-ма

ступенями свободи, що рухається у відповідності до законів, описаних наведено у таблиці 1. На рис. 1 показано огляд загальної ієрархії для автоматизованих суден.

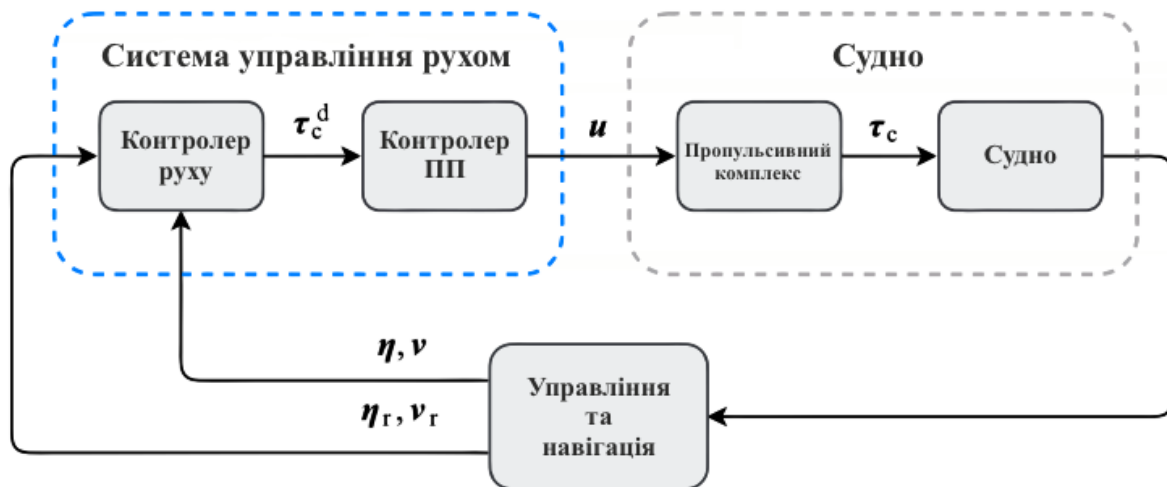


Рис. 1 Ієрархічна структура суднової автоматизованої системи управління рухом

Основною гіпотезою дослідження є припущення покращення точності утримання ТЗМБ, який працює в режимі динамічного позиціонування, за рахунок застосування методів та інструментів прогнозованого управління із використанням контролера високого рівня.

Для дослідження режиму динамічного позиціонування, загальна модель, що описує динаміку судна представлена виразами:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v, \quad (1)$$

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau, \quad (2)$$

де (1) описує кінематику ТЗМБ, а (2) описує кінетику. Матриця  $J(\eta) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$  є матрицею перетворення, тоді як матриці  $M \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ ,  $C(v) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$  та  $D(v) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$  описують інерційність приєднаних мас, сили Коріоліса та демпфування транспортного засобу відповідно. Вектор  $g(\eta) \in \mathbf{R}^6$  описує відновні сили, що діють на транспортний засіб за рахунок плавучості та гравітації. У правій частині (2)  $\tau \in \mathbf{R}^6$  є вектором сил і моментів, що створюються виконавчими механізмами підрулюючих пристроїв та факторами зовнішнього середовища (вітер, хвилі, течія) та діють на ТЗМБ впродовж певного експлуатаційного режиму [16-18]:

$$\tau = \tau_c + \tau_{env}, \quad (3)$$

де  $\tau_c$  – керуючі сили та моменти, а  $\tau_{env}$  – сили та моменти, що виникають внаслідок збурень довкілля.

Таблиця 1

Система параметрів або змінних для різних *DOF* судна або підводного апарату

№ з/п	<i>DOF</i>	Визначення параметра або змінної	Опис
1	6	$\eta = [xyz\phi\Theta\psi]^T \in \mathbf{R}^6$	Орієнтація ТЗМБ за 6 ступенями свободи, заданим положенням і кутами Ейлера в інерційній системі

2		$v = [xyzpqr]^T \in R^6$	Лінійна та кутова швидкості в нерухомій системі координат тіла
3		$\tau = [XYZKMN]^T \in R^6$	Декомпозиція сил і моментів для нерухомої системи координат тіла
4	3	$\eta = [xy\psi]^T \in R^3$	Горизонтальна орієнтація із 3 ступенями свободи, задана декартовою позицією $(x, y)$ і курсового кута $\psi$
5		$v = [uvr]^T \in R^3$	Швидкості судна в нерухомій системі координат під час прямолінійного руху $(u)$ , хитавиці $(v)$ і нишпоренні $(r)$ відповідно
6		$\tau = [XYN]^T \in R^3$	Сили та моменти в системі координат, закріпленій за тілом, під час прискорень $(X)$ , коливань $(Y)$ та поворотів $(N)$ відповідно.

Положення та курс  $\eta$  судна вимірюється в  $\{n\}$ , тоді як швидкості  $v$  і сили  $\tau$  будуть розкладені в  $\{b\}$  (рис. 2). Це є підставою для суто геометричних перетворення матриць у (2), які в результаті зводиться до:

$$\dot{\eta} = R(\psi)v, \quad (4)$$

у 3-DOF, де  $R(\psi) \in R^{3 \times 3}$  є матрицею, що обертається, заданою

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Кінетика описує рух тіла під дією сил і моментів. Модель кінетичного руху ТЗМБ можна вивести за допомогою механіки твердого тіла та теорії гідродинаміки [19, 20]. При розгляді руху ТЗМБ у 3-DOF, (2) разом із (3) зводиться до:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau_c + \tau_{env}, \quad (6)$$

де  $M, C(v)$  і  $D(v) \in R^{3 \times 3}$ .

З метою проектування контролера часто зручно працювати з лінійними моделями [21, 22]. Для обмежень щодо низьких швидкостей і з урахуванням квадратичної залежності непостійних членів у  $C(v)$  і  $D(v)$ , рівняння (6) можна спростити до лінійного динамічного рівняння:

$$M\dot{v} + D(v)v = \tau_c + \tau_{env}. \quad (7)$$

Якщо припустити, що ТЗМБ є симетричним у площині  $xbzb$  із початком координат  $\{b\}$ , що співпадає із центром тяжіння, то відповідні матриці, як правило, мають наступну структуру [23-25]:

$$M = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & \times \\ 0 & \times & \times \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & \times \\ 0 & \times & \times \end{bmatrix} \quad (8)$$

таким чином, що поступальний рух відокремлюється від хитавиці та нишпорення. Матричні елементи в  $M$  впливають з механічних властивостей конкретного ТЗМБ, таких як маса та інерція, а також з гідродинаміки, яка описує поведінку приєднаних мас води, тоді як елементи в  $D$  є чисто похідними від гідродинаміки [26, 27].

Об'єднавши динамічну модель (6) та (7) з (8) разом із обмеженнями, нелінійний безперервний час закону оптимального управління сформулюється наступним чином:

$$\begin{aligned} \min_{u_\tau} \int_0^{\tau, N} & \left( \|\eta - \eta_r\|_{Q_\eta}^2 + \|v - v_r\|_{Q_v}^2 + \|\tau_c^d\|_{Q_\tau}^2 + \|u_r\|_{Q_{u_r}}^2 \right) dt \\ \text{s.t. } \dot{\eta} &= R(\psi)v \\ M\dot{v} + Dv &= \tau_c^d \\ \dot{\tau}_c^d &= T_c(-\tau_c^d + \tau_a) \\ \dot{\tau}_a &= u_\tau \\ \underline{\tau}_c^d &\leq \tau_c^d \leq \bar{\tau}_c^d \\ \underline{u}_\tau &\leq u_\tau \leq \bar{u}_\tau, \end{aligned} \quad (9)$$

де отримання кінцевого значення передбачає ті ж самі умови, що й проміжні.

Проміжні функції у (9) дозволяють змінювати час на  $\eta$  і  $v$ , тоді як величина узагальненої сили та її швидкість відповідно корегуються. Вагові матриці  $Q_x$  можуть бути змінені в залежності від стратегії управління [28]. Наприклад, якщо потрібно рухатися за траєкторією, курс  $\psi$  і повздовжній рух  $u$  можуть бути точніше скореговані, одночасно корегуючи вагові коефіцієнти  $\tau_c^d$  за відповідними висями ( $x$ ,  $y$ ). Обмеження у (9) визначають динамічну модель і обмежують величину та швидкість узагальненої сили  $\tau_c^d$ .

Ефективність керування перевіряється в моделюванні з використанням відповідної моделі багатофункціонального пропульсивного комплексу для варіанту роботи двох ПП типу *Azipod*<sup>®</sup>, максимально рознесеними відносно діаметральної площини судна (рис. 2). Результати підсумовані на рис. 6, де візуалізовано рух моделі у двох напрямків [29].

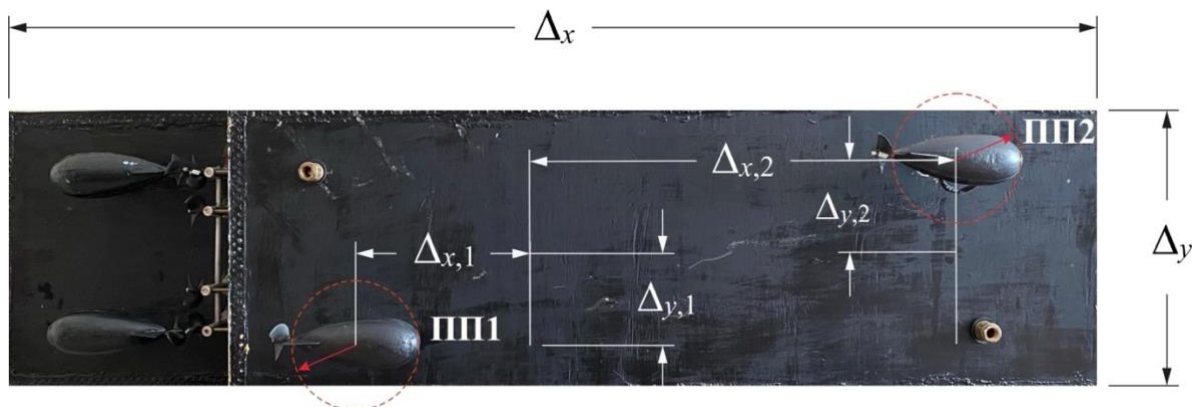


Рис. 2 Модель багатофункціонального пропульсивного комплексу

Параметри фізичної моделі, зображеної на рис. 2, наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри фізичної моделі багатofункціонального пропульсивного комплексу та ініціалізованих підрулюючих пристроїв

№ з/п	Параметр	Значення	
1	Довжина, $\Delta_x$	140 см	
2	Ширина, $\Delta_y$	40 см	
3	Осадка	20 см	
4	Водотоннажність	243 кг	
		ПП1	ПП2
5	$ \Delta_x $	38 см	64 см
6	$ \Delta_y $	16 см	16 см
7	Час азимутального обертання	22 с	22 с
8	Максимальна частота обертання гвинта	$\pm 145$ об/хвил	$\pm 145$ об/хвил
9	Максимальне прискорення частоти обертання гвинта	$\pm 0,06$ об/с <sup>2</sup>	$\pm 0,06$ об/с <sup>2</sup>

Таблиця 3

Зведені дані процедури параметризації ініціалізованих підрулюючих пристроїв

№ з/п	Початкове положення моделі	Початковий кут розташування ПП	Крок еталонної позиції $\eta_r$	Постійна часу $T_s$ , с	Горизонт прогнозування $N$ , с
1	$[-50, 0, 0]^T$	$[0, 0]^T$	$[80, 0, 0]^T$	1	80
2	$[-10, 40, 0]^T$	$[\pi/2, \pi/2]^T$	$[0, -50, 0]^T$	1	80

Відмінності між моделюваннями полягають у еталонній позиції та початковій орієнтації ініціалізованих двигунів ПП (див. таблицю 3). Параметри налаштування залишаються постійними продовж моделювання, під час якого здійснюються відхиляючі дії для провокування відхилення параметрів ПП від заданих. Збурення навколишнього середовища  $\tau_{env}$  у всіх симуляціях не застосовувалося, щоб підкреслити поведінку судна для відокремленої (автономної) природи MCS [30].

## ЛІТЕРАТУРА

1. Budashko, V. Formalization of design for physical model of the azimuth thruster with two degrees of freedom by computational fluid dynamics methods [Text] / V., Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 3. – № 7(87). – P. 40–49. Doi: [10.15587/1729-4061.2017.101298](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101298).
2. Fossen, T. (2021) Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. 2nd edn. Wiley. Available at: <https://www.perlego.com/book/2761053/handbook-of-marine-craft-hydrodynamics-and-motion-control-pdf> (Accessed: 12 January 2024).
3. Goor, van P. Constructive Equivariant Observer Design for Inertial Navigation / P. van Goor, T. Hamel, R. Mahony // IFAC-PapersOnLine. – 2023. – V. 56. – I. 2. – P. 2494–2499. ISSN 2405-8963. Doi: [10.1016/j.ifacol.2023.10.1229](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1229).
4. Maidana, R. G. Risk-based path planning for preventing collisions and groundings of maritime autonomous surface ships [Text] / R. G. Maidana, S. D. Kristensen, I. B. Utne, A. J. Sørensen // Ocean Engineering. – 2023. – V. 290. – P. 116417. ISSN 0029-8018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116417>.
5. Bekker, J. R. A Packaged System Approach to DP Vessel Conversion [Text] / J. R. Bekker, S. X. Dou // Dynamic positioning conference: Workboats. – 2002 (September 17 – 18). – 22 p. Режим

доступу: [\www/ URL: http://dynamic-positioning.com/proceedings/dp2002/workboats\\_packaged\\_system.pdf](http://www.dynamic-positioning.com/proceedings/dp2002/workboats_packaged_system.pdf). – 13.05.2024 г. – Загол. з екрану.

6. Cozijn, H. Analysis of the velocities in the wake of an azimuthing thruster, using PIV measurements and CFD calculations [Text] / H. Cozijn, R. Hallmann, A. Koop // Dynamic positioning conference: thrusters session. – October 12–13, 2010. – Houston: Maritime Research Institute Netherlands (MARIN). – 25 p. Режим доступа: [\www/ URL: http://www.refresco.org/wp-content/uploads/2015/05/2010-MTS-DP-Cozijn-Hallmann-Koop.pdf](http://www.refresco.org/wp-content/uploads/2015/05/2010-MTS-DP-Cozijn-Hallmann-Koop.pdf). – 24.08.2024 г. – Загол. з екрану.
7. Furmanik, M. Low-Speed Sensorless Control for Six-Phase PMSM Based on Magnetic Anisotropy / M. Furmanik, D. Konvičný, P. Rafajdus // Transportation Research Procedia. – 2023. – V. 74. – P. 892-899. ISSN 2352-1465. Doi: [10.1016/j.trpro.2023.11.222](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.222).
8. Hemalatha, N. Sensorless speed and position control of permanent magnet BLDC motor using particle swarm optimization and ANFIS [Text] / N. Hemalatha, S. Venkatesan, R. Kannan, S. Kannan, A. Bhuvanesh, A.S. Kamaraja // Measurement: Sensors. – 2024. – V. 31. – 100960. ISSN 2665-9174. Doi: [10.1016/j.measen.2023.100960](https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100960).
9. Sun, L. Low speed sensorless control method of brushless DC motor based on pulse high frequency voltage injection [Text] / L. Sun // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – V. 61, I. 8. – P. 6457-6463. ISSN 1110-0168. Doi: [10.1016/j.aej.2021.12.005](https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.12.005).
10. Budashko, V., Sandler, A., & Khniunin, S. (2023). Improving the method of linear-quadratic control over a physical model of vessel with azimuthal thrusters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(2 (121)), 49–71. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273934>.
11. Fernandes, Daniel de A. Trajectory Tracking Motion Control System for Observation Class ROVs [Text] / D. de A. Fernandes, A. J. Sorensen, D. C. Donha // IFAC Proceedings Volumes. – 2013. – V. 46, I. 33. – P. 251-256. ISSN 1474-6670, ISBN 9783902823526. Doi: <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00025>.
12. Houska, B. ACADO Toolkit – An Open Source Framework for Automatic Control and Dynamic Optimization [Text] / B. Houska, H. Ferreau, Diehl, M. // Optimal Control Applications and Methods. – 2011. – V. 32(3). – P. 298–312. Doi: <https://doi.org/10.1002/oca.939>.
13. Johansen, T. A. Control allocation – A survey. [Text] / T. A. Johansen, T. I. Fossen // Automatica. – 2013. – V. 49, I. 5. – P. 1087-1103. ISSN 0005-1098. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.01.035>.
14. Yari, E. Hydrodynamic analysis of the surface-piercing propeller in unsteady open water condition using boundary element method [Text] / E. Yari, H. Ghassemi // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2016. – V. 8, I. 1. – P. 22–37. Doi: [10.1016/j.ijnaoe.2015.09.002](https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2015.09.002).
15. Budashko, V. Formalization of design for physical model of the azimuth thruster with two degrees of freedom by computational fluid dynamics methods [Text] / V., Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 3. – № 7(87). – P. 40–49. Doi: [10.15587/1729-4061.2017.101298](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101298).
16. Glad, T., & Ljung, L. (2000). Control Theory (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315274737>.
17. Budashko, V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes [Text] / V. Budashko // 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Istanbul, 12-13 June 2020, Turkey: IEEE. Pp. 1-6. Doi: [10.1109/ICECCE49384.2020.9179301](https://doi.org/10.1109/ICECCE49384.2020.9179301).
18. Brezina, A. J. Measurement of Static and Dynamic Performance Characteristics of Electric Propulsion Systems [Text] / A. J. Brezina, S. K. Thomas; American Institute of Aeronautics and Astronautics // 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. – Grapevine (Dallas/Ft. Worth Region), Texas, 2013 (07 – 10 January). Doi: [10.2514/6.2013-500](https://doi.org/10.2514/6.2013-500).
19. Bucknall, R. W. G. On the Conceptual Design and Performance of a Matrix Converter for Marine Electric Propulsion [Text] / R. W. G. Bucknall, K. M. Ciaramella // IEEE Transactions on Power Electronics, 2010. – V. 25, I. 6. – P. 1497–1508. Doi: [10.1109/TPEL.2009.2037961](https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2037961).
20. Zhong, Y. Diving dynamics identification and motion prediction for marine crafts using field



- data [Text] / Journal of Ocean Engineering and Science // Y. Zhong, C. Yu, Y. Bai, Z. Zeng, L. Lian. – 2023. ISSN 2468-0133. Doi: [10.1016/j.joes.2023.12.001](https://doi.org/10.1016/j.joes.2023.12.001).
21. Abdessameud, A. Motion coordination of thrust-propelled under actuated vehicles with intermittent and delayed communications [Text] // A. Abdessameud, I.G. Polushin, A. Tayebi // Systems & Control Letters. – 2015. – V. 79. – P. 15–22. Doi: [10.1016/j.sysconle.2015.02.006](https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2015.02.006).
22. Babadi, M. K. Effect of hull form coefficients on the vessel sea-keeping performance [Text] / M. K. Babadi, H. Ghassemi; Department of Ocean Engineering, AmirKabir University of Technology // Journal of Marine Science and Technology. – 2013. – 11 p. Doi: [10.6119/JMST-013-0117-2](https://doi.org/10.6119/JMST-013-0117-2).
23. Budashko, V. Optimization of the control system for an electric power system operating on a constant power hyperbole [Text] / V. Budashko, A. Sandler, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – V. 1. – № 8(115). – P. 6-17. ISSN 1729-3774. Doi: [10.15587/1729-4061.2022.252172](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252172).
24. Carrera, A. Cognitive system for autonomous underwater intervention [Text] / A. Carrera, N. Palomeras, N. Hurtós, P. Kormushev, M. Carreras // Pattern Recognition Letters. – 2015. – V. 67(1). – P. 91–99. Doi: [10.1016/j.patrec.2015.06.010](https://doi.org/10.1016/j.patrec.2015.06.010).
25. Budashko, V. Diagnosis of the Technical Condition of High-tech Complexes by Probabilistic Methods [Text] / V. Budashko, A. Sandler, V. Shevchenko // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav). – 2022. – V. 16. – № 1. – P. 105-111. ISSN 2083-6473, ISSN 2083-6481 (electronic version). Doi: [10.12716/1001.16.01.11](https://doi.org/10.12716/1001.16.01.11).
26. Budashko, V., Sandler, A., & Khniunin, S. (2023). Improving the method of linear-quadratic control over a physical model of vessel with azimuthal thrusters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(2 (121), 49–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273934>.
27. Budashko, V. The synthesis of control system to synchronize ship generator assemblies [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – V. 1. – № 2(109). – P. 45-63. ISSN 1729-3774. Doi: [10.15587/1729-4061.2021.225517](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225517).
28. Budashko, V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – V. 2. – № 2(110). – P. 54-70. ISSN 1729-3774. Doi: [10.15587/1729-4061.2021.229033](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229033).
29. Sandler, A. Improving tools for diagnosing technical condition of ship electric power installations [Text] / A. Sandler, V. Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – V. 5. – № 5(119). – P. 25-33. ISSN 1729-3774. Doi: [10.15587/1729-4061.2022.266267](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266267).
30. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. (2023). Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Applied physics, 5 (5(125)), 24-31. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289773>.