

УДК 62-519
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).20](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).20)

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR OPTIMIZING ENERGY CONSUMPTION OF A SMALL AUTONOMOUS VESSEL BASED ON A PREDICTIVE CONTROL MODEL

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ МАЛОГО АВТОНОМНОГО СУДНА НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ

Bohdan O. Yermolenko
bohdan.errmolenko@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-0353-891X

Б. О. Єрмоленко,
аспірант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The development of unmanned surface vessels (USV) faces numerous challenges and scientific problems. The search for ways to improve motion efficiency under a fixed onboard power supply capacity represents an important scientific task. During the study, existing approaches to the optimization of USV motion were reviewed and analyzed. The *purpose* of this paper is to address the problem of improving the energy efficiency of a small autonomous surface vessel (USV) with electric propulsion intended for hydrographic monitoring tasks. The *relevance* of the research is driven by the limited energy resources of onboard power systems and the need to ensure long-term autonomous operation of small-class vessels under variable and uncertain environmental conditions. Modern approaches to USV control are analyzed, including trajectory optimization methods and classical control algorithms, which are mainly focused on navigation accuracy or minimization of travel time without considering energy consumption. Based on the results of the energy consumption analysis of an electrically propelled autonomous surface vessel, it is established that the main energy losses occur during motion, especially in maneuvering modes, speed changes, and in the presence of external disturbances. It is shown that energy consumption has a pronounced nonlinear and dynamic nature, which reduces the effectiveness of static or single-step optimization methods. An energy-oriented approach to motion control of the USV based on model predictive control (MPC) is proposed. A consistent mathematical model is developed that integrates the vessel dynamics, the energy model of the propulsion system, and the battery state-of-charge dynamics into a single optimization problem. The optimization criteria include minimization of energy consumption, maintenance of an average optimal cruising speed, trajectory smoothness, and control of the battery state of charge while accounting for physical system constraints. Numerical simulations performed in the MATLAB environment confirm the effectiveness of the proposed approach, demonstrating reduced energy consumption during motion and adaptive adjustment of control modes depending on the battery charge level. The proposed MPC algorithm can be applied in the development of control systems for small autonomous surface platforms used in hydrographic, environmental, and scientific monitoring tasks. In *conclusion*, the obtained results enable further enhancement of the main control controller by improving the overall energy efficiency of the electromechanical system.

Key words: autonomous surface vessel; navigation; energy efficiency; remote operation; electric propulsion.

Анотація. Розвиток АНС стикається з багатьма викликами та науковими проблемами. Пошук шляхів підвищення ефективності руху при фіксованому об'ємі джерела живлення є важливим науковим завданням. У процесі виконання дослідження було проведено пошук та аналіз наявних підходів до оптимізації руху автономних надводних суден. *Метою* статті є вирішення завдання підвищення енергоефективності малого автономного надводного судна (МАНС) з електричним рушієм, призначеного для виконання задач гідрографічного моніторингу. *Актуальність дослідження* обумовлена обмеженим енергетичним ресурсом бортових джерел живлення та необхідністю забезпечення тривалої автономної роботи суден малого класу в умовах змінного зовнішнього середовища. Проаналізовано сучасні підходи до керування автономними надводними суднами, зокрема методи оптимізації траєкторії та класичні алгоритми керування, які переважно орієнтовані на навігаційну точність або мінімізацію часу руху без урахування енергетичних витрат. На основі результатів аналізу енергоспоживання автономного надводного судна з електричним приводом встановлено, що основні втрати енергії виникають під час руху, особливо в режимах маневрування, зміни швидкості та за наявності зовнішніх збурень. Показано, що

енерговитрати мають виражений нелінійний та динамічний характер, що знижує ефективність застосування статичних або одноразових оптимізаційних методів. Запропоновано енергетично орієнтований підхід до керування рухом МАНС на основі моделі прогнозованого керування. Сформовано узгоджену математичну модель, яка поєднує динаміку руху судна, енергетичну модель рушійної установки та динаміку заряду акумуляторної батареї в єдиній оптимізаційній задачі. Критерії оптимізації включають мінімізацію енергоспоживання, підтримку середньо-оптимальної швидкості руху, забезпечення плавності траєкторії та контроль стану заряду акумулятора з урахуванням фізичних обмежень системи. Чисельне моделювання в середовищі MATLAB підтвердило ефективність запропонованого підходу, що проявляється у зниженні енерговитрат під час руху та адаптивному коригуванні режимів керування залежно від рівня заряду акумулятора. Запропонований MPC-алгоритм може бути використаний при розробці систем керування малорозмірних автономних надводних платформ для задач гідрографічного, екологічного та наукового моніторингу.

Як **висновок** результати дозволять в подальшому розширити можливості основного керуючого контролера завдяки підвищенню загальної енергоефективності електромеханічної системи.

Ключові слова: автономне надводне судно; навігація; енергоефективність; дистанційне керування; електричний двигун.

ВСТУП

Розвиток автономних надводних платформ малого класу обумовлений зростанням потреб у тривалому моніторингу водних об'єктів. Впровадження нових технічних рішень для дослідження водного середовища пов'язане з стрімким розвитком роботизованих технологій. Одним із таких новітніх засобів є малі автономні надводні судна (МАНС). Відносно невелика ціна, можливості по технічному налаштуванню а також відносно не великий розмір дозволяє виконувати різноманітні завдання пов'язані з дослідженням водних ресурсів. МАНС сформувалась як окрема галузь яка стрімко розвивається. Дослідження робіт по цій тематиці підтверджує актуальність напрямку автономних надводних суден [1–3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розвиток АНС стикається з багатьма викликами та науковими проблемами. Тому науковці працюють над подоланням цих проблем. Важливим пунктом у розвитку галузі автономних надводних суден є підвищення енергоефективності. Це питання впливає на можливості використання АНС для довготривалих наукових місій. Для МАНС які в якості основного пропульсивного комплексу які використовують електричний рушій питання, збільшення довготривалості роботи найбільш актуально. Пошук шляхів підвищення ефективності руху при фіксованому об'ємі джерела живлення є важливим науковим завданням. При цьому ключовим завданням залишається мінімізація енерговитрат, особливо в умовах обмежених ресурсів на борту.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методологія підходів до покращення показників ефективності включає в себе різносторонні напрями, які охоплюють як електромеханічний вплив на систему, так і програмно-алгоритмічні, енергетичні аспекти її функціонування. Беручи до уваги стали електромеханічну систему з фіксованим об'ємом акумулятора як основного джерела живлення, доцільно шукати

альтернативний підхід, зосереджений на використанні енергоефективних елементів що забезпечують зниження загальних енерговитрат без зміни параметрів системи.

Іншим напрямом є розвиток альтернативних можливостей які дозволять знизити витрати енергії. Одним із таких шляхів є оптимізація. У процесі виконання дослідження було проведено пошук та аналіз наявних підходів до оптимізації руху автономних надводних суден, зокрема класичних методів оптимізації траєкторій, евристичних алгоритмів, а також алгоритмів керування, що базуються на фіксованих правилах або локальних критеріях оптимальності. Аналіз показав, що більшість розглянутих підходів орієнтовані переважно на мінімізацію часу проходження маршруту, геометричної довжини траєкторії або відхилення від заданої лінії руху [4–7]. Оптимізація фокусується на процесі руху роботизованої системи по фіксованому маршруту, при цьому енергетичні витрати або не враховуються взагалі, або розглядаються частково.

Отримані попередні результати досліджень в роботах [8–9] формують основу для розробки підходу оптимізація витрат. Також результати проведеного аналізу енергоспоживання автономного надводного судна з електричним приводом свідчать, що енерговитрати є суттєво нелінійно залежними від режиму руху, швидкості, динамічних змін керуючих впливів та зовнішніх збурень, та впливають на витрати енергії найбільше. Це обмежує можливості застосування традиційних оптимізаційних алгоритмів, які не враховують взаємозалежність між процесом руху та миттєвими і накопиченими енергетичними витратами, а також не забезпечують адаптації керування в умовах змінного середовища. Одним із потенційно ефективних методів можна вважати підхід модельно-прогнозованого керування (MPC), яке широко застосовується для керування рухом різноманітних засобів, та зокрема безпілотних систем різного середовища функціонування.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою цієї роботи є підвищення енергоефективності малого автономного надводного судна за рахунок формування підходу оптимізації витрат енергії у процесі виконання гідрографічного моніторингу. Для вирішення цього завдання, застосовується енергетична модель автономного судна та параметри оптимізації які повинні формувати основу алгоритму.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Підвищення ефективності застосування автономних надводних суден (АНС) спирається на застосування низки існуючих підходів, спрямованих на вдосконалення процесу руху під час виконання навігаційних завдань. Аналізуючи загальні досягнення у галузі сучасної робототехніки, можна виокремити низку отриманих результатів, що формують наукове підґрунтя для відокремлення не вирішених завдань, зокрема дослідженню питання енергооптимального керування автономними надводними суднами.

Розглядаючи питання оптимізації для автономних суден, здебільшого цей процес фокусується на процесі переміщення. Значний обсяг наукових публікацій присвячено розробці методів оптимізації керування безекіпажними надводними суднами. У цих роботах описується різні підходи оптимізації, зокрема методи зворотного кроку [10], лінійно-квадратичні регулятори [11], адаптивне керування [12], алгоритми оптимізації [13]. Водночас у працях основна увага зосереджена на задачах контролю траєкторії руху АНС, яка, хоча і є критично важливою для навігації та маневрування, не враховує безпосередньо питання оптимізації енерговитрат, що і обумовлює актуальність даного дослідження.

Питання енергоефективності розглянуті у роботах [14–15] розглядається підвищення енергоефективності шляхом застосування оптимізаційних алгоритмів в роботизованих системах, та квадрокоптерах. Але такий підхід до вирішення наукової проблеми підвищення енергоефективності в автономних надводних суднах не розповсюджений.

Пошук потенційних шляхів, та виконані попередні дослідження у роботах [8–9], сформували напрями які будуть розглядатись у цій роботі. Згідно отриманим результатам, процес оптимізації використання енергії МАНС має фокусуватись навколо основної електромеханічної структури. В свою чергу, вимоги оптимізації повинні враховувати всі чинники які впливають на витрати енергії. Комплексний підхід до аналізу процесу витрат дозволяє створити стратегію оптимізації яка підвищить ефективність автономного засобу, що позитивно вплине на користування на практиці. Беручи до уваги отримані результати де виявлено що процес руху вимагає найбільше енергії, а при застосуванні отриманих критеріїв оптимізації отримано підвищення енергоефективності підчас

руху, доцільно врахувати ключові параметри при формуванні підходу. Основні функції які будуть формувати оптимізацію це:

- середньо-оптимальна швидкість руху;
- плавність траєкторії руху;
- контроль за станом заряду акумулятора.

Результати моделювання енергоспоживання АНС також засвідчили, що основні втрати енергії виникають саме під час руху – у моменти зміни швидкості, маневрування та подолання хвилювання. Це дає підстави вважати що енерговитрати АНС мають виражений динамічний характер: реальна тяга двигуна, опір корпусу та фактичне навантаження можуть відхилятися від розрахункових значень, що робить статичні або однокрокові оптимізаційні підходи малоефективними.

Серед наявних підходів найбільш повно цим вимогам відповідає модель прогнозованого керування (Model Predictive Control, MPC). Модель прогнозованого керування – це метод, що використовує математичну модель об'єкта для прогнозування його стану в майбутні моменти часу [16]. На кожному кроці MPC обчислює оптимальну послідовність керуючих дій, мінімізуючи заданий критерій якості. На відміну від класичних регуляторів або статичних підходів, MPC поєднує кілька важливих властивостей:

- прогнозування майбутніх станів АНС на основі математичної моделі;
- адаптивне коригування сигналів керування на кожному кроці, враховуючи оновлені дані;
- можливість оптимізувати енергоспоживання як основний критерій (наприклад, мінімум спожитої потужності на інтервалі прогнозу);

З огляду на сформовані вимоги оптимізації, та попередні результати дослідження, постійне оновлення стану дозволить контролювати стан заряду акумулятора під час руху. Енергетично ефективне керування автономним надводним судном (АНС) буде сформовано як задача MPC. У даній роботі MPC застосовується не лише як інструмент стабілізації руху, а як засіб енергетично орієнтованого керування, що забезпечує формування плавної траєкторії, підтримку середньо-оптимальної швидкості руху та раціональне використання заряду акумулятора. Нижче наведено математичну постановку задачі керування автономним надводним судном, у якій стан системи, енергетична модель та заряд батареї розглядаються в єдиній оптимізаційній задачі MPC з урахуванням обмежень та енергетичних критеріїв.

В основі підходу використовується енергетична модель МАНС:

$$E_{\text{анс}} = \int P_{\text{анс}} dt = \sum P_{\text{анс}} \times \delta t.$$

Алгоритм використовує модель руху автономного судна у горизонтальній площині, рух якого у горизонтальній площині описується вектором стану:

$$x_k = [x_k, y_k, \psi_k, v_k, SoC_k]^T,$$

де: x_k, y_k – координати; ψ_k – курс; v_k – лінійна швидкість; SoC_k – відносний стан акумуляторної батареї.

Для малого автономного надводного судна (АНС) розміром до 1.5 м з електричним BLDC-рушійним комплексом і серво-системою керування застосовується спрощену модель руху в горизонтальній площині:

$$\begin{cases} \eta = R(\psi)v \\ Mv + C(v)v + D(v)v = \tau + \tau_{env} \end{cases},$$

де: $\eta = [x, y]$.

Дискретна кінематично-динамічна модель АНС має вигляд::

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + v_k \cos \psi_k \Delta t, \\ y_{k+1} = y_k + v_k \sin \psi_k \Delta t, \\ \psi_{k+1} = \psi_k + r_k \Delta t, \\ x_{k+1} = v_k + \frac{1}{m}(T_k - c_d v_k^2) \Delta t, \end{cases}$$

де: m – маса судна; c_d – коефіцієнт опору.

Потужність пропульсивної системи вираховується залежністю:

$$P_k = P_0 + k_v v_k^3,$$

де P_0 – базове енергоспоживання бортової системи;

Для зменшення енерговитрат вводиться енергетично доцільна швидкість руху $V_{optimal}$, що визначається з урахуванням базових енерговитрат, а також з завдань гідрографічного моніторингу де висока швидкість руху не є необхідним параметром. Оптимальна швидкість використовується MPC підходом протягом всього горизонту прогнозування.

Сам підхід формується наступним чином. Нехай x_k^{ref} – опорна траєкторія. Цільова функція MPC матиме вигляд:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} (e_k^T Q e_k + \alpha (v_k - v_{optimal})^2 + \beta u_k - u_{k-1}^2 + \gamma P_k + \mu \phi(SoC_k)),$$

де: Q – матриця ваг похибки траєкторії, α – вага контролю енергооптимальної швидкості, β – коефіцієнт плавності руху, γ – коефіцієнт енергоспоживання,

Функція контролю зниження заряду акумулятора:

$$\phi(SoC_k) = \max(0, SoC_{min} - SoC_k)^2.$$

В оптимізаційну задачу вводяться обмеження на основі визначених критеріїв оптимізації:

$$T_{min} \leq T_k \leq T_{max},$$

$$\delta_{min} \leq \delta_k \leq \delta_{max},$$

$$0 \leq v_k \leq v_{max},$$

$$SoC_k \geq SoC_{min},$$

На основі цього, задача керування формується як:

$$\min_{u_0, \dots, u_{N-1}} J$$

за умов:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k),$$

$$x_0 = x(t),$$

$$x_0 \in X, \quad u_k \in U.$$

Запропонований MPC-алгоритм формує енергетично доцільний режим руху автономного надводного судна, підтримуючи середньо-оптимальну швидкість та адаптивно коригуючи стан з урахуванням поточного заряду батареї (Рисунок 1).

Результати чисельного моделювання в середовищі MATLAB підтвердили ефективність запропонованого енергетично орієнтованого MPC-підходу. Отримані часові залежності швидкості та керуючої дії свідчать про формування плавного режиму руху

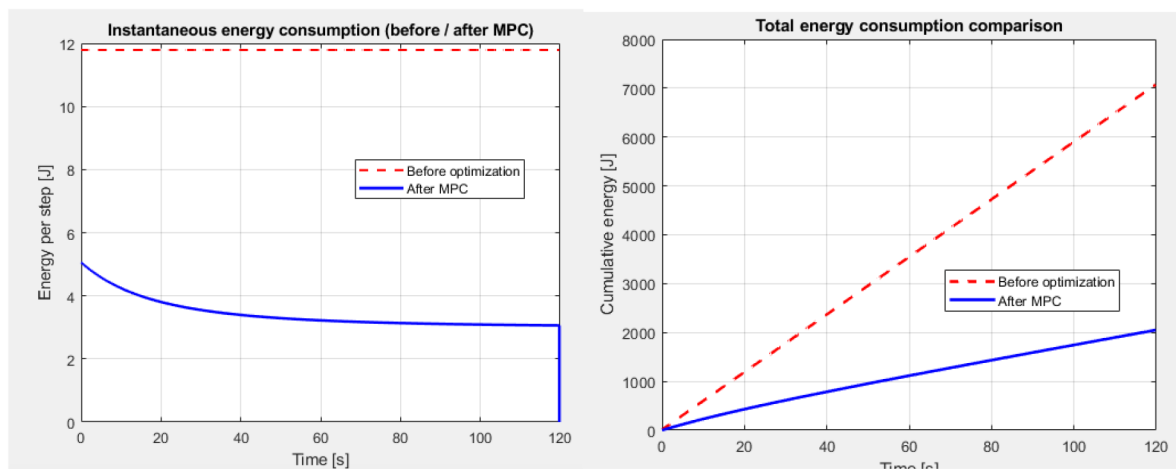


Рис. 1. Математичний аналіз у Matlab.

з утриманням середньо-оптимальної швидкості, що забезпечує зниження миттєвих та інтегральних енерговитрат.

ВИСНОВКИ

У даній роботі розглянуто задачу підвищення енергоефективності автономного надводного судна з електричним рушієм шляхом застосування енергетично орієнтованого підходу моделі прогнозованого керування. На відміну від традиційних алгоритмів керування, що зосереджені переважно на мінімізації похибки слідування траєкторії, запропонований підхід враховує енергетичні характеристики руху, плавність маневрування та обмеження, пов'язані з кінцевою ємністю акумуляторної батареї. Розроблено узгоджену математичну модель, яка поєднує динамічний опис руху автономного надводного судна, енергетичну модель рушійної установки та динаміку заряду акумулятора.

Це дозволило сформулювати задачу керування у вигляді єдиної оптимізаційної задачі MPC з урахуванням фізичних обмежень та енергетичних критеріїв. Чисельне моделювання, реалізоване в середовищі MATLAB, підтвердило ефективність запропонованого підходу. Водночас алгоритм забезпечує стабільне слідування заданій траєкторії та адаптивну зміну режиму руху при зниженні рівня заряду акумулятора. Запропонований метод може бути безпосередньо використаний при розробці систем керування мало-розмірних автономних надводних платформ, призначених для задач гідрографічного моніторингу, екологічного спостереження та пошукових операцій. Подальші дослідження доцільно спрямувати на роботу з програмним забезпеченням керуючого контролера, експериментальне тестування алгоритму на реальному зразку МАНС, а також розширення моделі з урахуванням просторового планування маршруту.

REFERENCES

- [1] Morel, T. A., Manzano, J. M., Bejarano, G., & Orihuela Espina, D. L. (2022). Modelling and Identification of an Autonomous Surface Vehicle. Technical Report.
- [2] Kim, S.-R., Jo, H.-J., Kim, J.-H., & Park, J.-Y. (2023). Development of an autonomous docking system for autonomous surface vehicles based on symbol recognition. *Ocean Engineering*, 283, 114753. ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114753>
- [3] Zhang, Y., Rueda, C., Kieft, B., Ryan, J. P., Wahl, C., O'Reilly, T. C., Maughan, T., & Chavez, F. P. (2019). Autonomous tracking of an oceanic thermal front by a Wave Glider. *Journal of Field Robotics*, 36, 940–954. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761070>
- [4] Han, S., Wang, L., Wang, Y., & He, H. (2022). A dynamically hybrid path planning for unmanned surface vehicles based on non-uniform Theta* and improved dynamic windows approach. *Ocean Engineering*, 257, 111655. ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111655>
- [5] Xie, L., Xue, S., Zhang, J., Zhang, M., Tian, W., & Haugen, S. (2019). A path planning approach based on multi-direction A* algorithm for ships navigating within wind farm waters. *Ocean Engineering*, 184, 311–322. ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.055>
- [6] Niu, H., Savvaris, A., Tzourdos, A., & Ji, Z. (2019). Voronoi-visibility roadmap-based path planning algorithm for unmanned surface vehicles. *Journal of Navigation*, 72, 850–874. <https://doi.org/10.1017/S0373463318001005>
- [7] Guo, Q., Zhang, R., Liu, J., & Chen, L. (2023). An improved RRT algorithm based on prior AIS information and DP compression for ship path planning. *Ocean Engineering*. Volume 279, 114595, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114595>
- [8] Yermolenko, B. O. (2024). Optymizatsiia rukhu avtonomnoho nadvodnoho sudna na elektrychnii tiazii yak shliakh pidvyshchennia enerhoeffektyvnosti [Optimization of the motion of an autonomous surface vessel with electric propulsion as a way to increase energy efficiency]. *Zbirka naukovykh prats NUOS – Collection of Scientific Papers of NUOS*, 1(494). [https://doi.org/10.15589/znp2024.1\(494\)](https://doi.org/10.15589/znp2024.1(494)). [in Ukrainian].
- [9] Yermolenko, B. O. (2024). Rezultaty vprovadzhennia lohistychnoho metodu pidvyshchennia efektyvnosti enerhetychnoi systemy avtonomnoho nadvodnoho sudna [Results of implementing a logistics method to improve the efficiency of the energy system of an autonomous surface vessel]. *Zbirka naukovykh prats NUOS – Collection of Scientific Papers of NUOS*, 3(496). [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\)](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496)). [in Ukrainian].
- [10] Sonnenburg, C. R., & Woolsey, C. A., (2013). Modeling, identification, and control of an unmanned surface vehicle. *Journal of Field Robotics*, 30, 371–398. <https://doi.org/10.1002/rob.21452>
- [11] Maalouf, D., Chemori, A., & Creuze, V., (2015). L1 adaptive depth and pitch control of an underwater vehicle with real-time experiments. *Ocean Engineering*, 98, 66–77. ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.02.002>
- [12] Canfield, S. L., Hill, T. W., & Zuccaro, S. G., (2018). Prediction and experimental validation of power consumption of skid-steer mobile robots in manufacturing environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 94, 825–839 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0779-7>
- [13] Vagale, A., Oucheikh, R., Bye, R. T., Osen, O. L., & Fossen, T. I., (2021). Path planning and collision avoidance for autonomous surface vehicles I: A review. *Journal of Marine Science and Technology*, 26, 1292–1306. <https://doi.org/10.1007/s00773-020-00787-6>
- [14] Xu, W., Liu, H., Liu, J., Zhou, Z., & Pham, D.T., (2017). A practical energy modeling method for industrial robots in manufacturing. In: *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10228. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61994-1_3

- [15] Morales, M. F., Dogru, S., Marques, L., & Gómez, J. B., (2019). Predictive power estimation for a differential drive mobile robot based on motor and robot dynamic models. In: Proc. IEEE Int. Conf. on Robotic Computing (IRC), pp. 301–307. <https://doi.org/10.2478/AUSEME-2018-0002>
- [16] Richards, A., & How, J.P., (2007). Robust distributed model predictive control. *International Journal of Control*, 80, 1517–1531. <https://doi.org/10.1080/00207170701491070>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Morel, T. A., Manzano, J. M., Bejarano, G., Orihuela Espina, D. L. (2022). Modelling and Identification of an Autonomous Surface Vehicle. Technical Report.
- [2] Kim, S.-R., Jo, H.-J., Kim, J.-H., Park, J.-Y. (2023). Development of an autonomous docking system for autonomous surface vehicles based on symbol recognition. *Ocean Engineering*, 283, 114753. ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114753>
- [3] Zhang, Y., Rueda, C., Kieft, B., Ryan, J. P., Wahl, C., O'Reilly, T. C., Maughan, T., Chavez, F. P. (2019). Autonomous tracking of an oceanic thermal front by a Wave Glider. *Journal of Field Robotics*, 36, 940–954. 10.1109/OCEANS.2016.7761070
- [4] Han, S., Wang, L., Wang, Y., He, H. (2022). A dynamically hybrid path planning for unmanned surface vehicles based on non-uniform Theta* and improved dynamic windows approach. *Ocean Engineering*, 257, 111655. ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111655>
- [5] Xie, L., Xue, S., Zhang, J., Zhang, M., Tian, W., Haugen, S. (2019). A path planning approach based on multi-direction A* algorithm for ships navigating within wind farm waters. *Ocean Engineering*, 184, 311–322.
- [6] Xie, L., Xue, S., Zhang, J., Zhang, M., Tian, W., Haugen, S. (2019). A path planning approach based on multi-direction A* algorithm for ships navigating within wind farm waters. *Ocean Engineering*, 184, 311–322. ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.055>
- [7] Guo, Q., Zhang, R., Liu, J., Chen, L. (2023). An improved RRT algorithm based on prior AIS information and DP compression for ship path planning. *Ocean Engineering*. Vol. 279, 114595, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114595>
- [8] Єрмоленко, Б. О. (2024). Оптимізація руху автономного надводного судна на електричній тязі як шлях підвищення енергоефективності. *Збірник наукових праць НУК*, 1(494). doi:10.15589/znp2024. 1(494).
- [9] Єрмоленко, Б. О. (2024). Результати впровадження логістичного методу підвищення ефективності енергетичної системи автономного надводного судна. *Збірник наукових праць НУК*, 3(496). [https://doi.org/10.15589/znp2024. 3\(496\)](https://doi.org/10.15589/znp2024. 3(496))
- [10] Sonnenburg, C. R., Woolsey, C. A., (2013). Modeling, identification, and control of an unmanned surface vehicle. *Journal of Field Robotics*, 30, 371–398. <https://doi.org/10.1002/rob.21452>
- [11] Maalouf, D., Chemori, A., Creuze, V., (2015). L1 adaptive depth and pitch control of an underwater vehicle with real-time experiments. *Ocean Engineering*, 98, 66–77. ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.02.002>
- [12] Canfield, S. L., Hill, T. W., Zuccaro, S. G., (2018). Prediction and experimental validation of power consumption of skid-steer mobile robots in manufacturing environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 94, 825–839 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0779-7>
- [13] Vagale, A., Oucheikh, R., Bye, R. T., Osen, O. L., Fossen, T. I., (2021). Path planning and collision avoidance for autonomous surface vehicles I: A review. *Journal of Marine Science and Technology*, 26, 1292–1306. <https://doi.org/10.1007/s00773-020-00787-6>
- [14] Xu, W., Liu, H., Liu, J., Zhou, Z., Pham, D.T., (2017). A practical energy modeling method for industrial robots in manufacturing. In: *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10228. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61994-1_3
- [15] Morales, M. F., Dogru, S., Marques, L., Gómez, J. B., (2019). Predictive power estimation for a differential drive mobile robot based on motor and robot dynamic models. In: Proc. IEEE Int. Conf. on Robotic Computing (IRC), pp. 301–307. <https://doi.org/10.2478/AUSEME-2018-0002>
- [16] Richards, A., How, J. P., (2007). Robust distributed model predictive control. *International Journal of Control*, 80, 1517–1531. <https://doi.org/10.1080/00207170701491070>

© Єрмоленко Б. О.

Дата надходження статті до редакції: 23.11.2025

Дата затвердження статті до друку: 11.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0