

УДК 62-519

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2024.3\(496\).9](https://doi.org/10.15589/znп2024.3(496).9)

RESULTS OF THE IMPLEMENTATION OF THE LOGISTICS METHOD OF INCREASING THE EFFICIENCY OF THE ENERGY SYSTEM OF AN AUTONOMOUS SURFACE VESSEL

РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ЛОГІСТИЧНОГО МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОНОМНОГО НАДВОДНОГО СУДНА

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. Robotic systems are a promising field of scientific research. Autonomous surface vessels are a representative of this industry. These are systems that can perform certain missions without the direct presence of people on board. From the beginning of the development of the first samples to the present day, a large number of options have been created that differ in size, purpose, types of propulsive installation and application area. Currently, the study of water resources is inextricably linked with the use of such vessels. Such autonomous vessels can solve a wide range of tasks, and thanks to advances in microcontrollers and electronics, work on a par with large USV, and receive and transmit a large amount of data, for example, on the state of water pollution, bathymetric analysis of the water bottom. The latest stage of this direction can be considered the development of autonomous surface vessels of the compact class. Developers are working on improving these tools and investigating existing problems. One of these problems is the autonomy of ships, for electric propulsion plants this is the most urgent issue. *The purpose* of this article is to continue the study of the USV energy system, to improve the general structural model, and to study the results of the impact of the logistic method. To achieve this goal, mathematical modeling and calculations will be performed in the MATLAB software complex. *The results* of the article are a modeled energy model of an autonomous ship with an electronic propulsion system with a logistic method of increasing energy efficiency added to it, which sets requirements for the uniformity of movement and as a conclusion, the obtained data demonstrate a positive result of the implementation of this approach, further research of the logistic approach and its implementation in the navigation system of the USV will make it possible to reduce energy consumption in an autonomous surface vessel of a compact class. Expanding the energy model, as well as taking into account the costs of the sensor and navigation system, made it possible to model all energy costs in the middle of the USV in more detail.

Key words: Autonomous surface vessel; navigation; remote control; electric motor; energy efficiency.

Анотація. Роботизовані системи це перспективна галузь наукових досліджень. Представником цієї галузі є Автономні надводні судна. Це системи які можуть виконувати певні місії без прямої присутності людей на борту. З початку розробки перших зразків до сьогодення створено велика кількість варіантів які вирізняються розмірами, призначенням, типами пропульсивної установки та зоною застосування. Дослідження водних ресурсів наразі нерозривно пов'язано з застосуванням подібних суден. Подібні автономні судна можуть вирішувати широкий спектр завдань, та завдяки досягненням у мікроконтролерах та електроніці працювати на рівні з великими АНС, та отримувати і передавати великий обсяг даних, наприклад про стан забруднення води, батиметричний аналіз водного дна. Новітнім етапом цього напрямку можна вважати розробку автономних надводних суден компактного класу. Розробники працюють над вдосконаленням цих засобів, та досліджуючи існуючі проблеми. Однією з таких проблем є автономність суден, для електричних пропульсивних установок це найбільш актуальне питання. *Метою* даної статті є продовження дослідження енергетичної системи АНС, покращення загальної структурної моделі та дослідженню результатів впливу логістичного методу. Для досягнення цієї мети буде виконане математичне моделювання, розрахунки у програмному комплексі MATLAB. *Результатами* статті є промодельована енергетична модель автономного судна з електронною пропульсивною установкою з доданням до неї логістичним методом підвищення енергоефективності, який висуває вимоги до рівномірності руху та як *висновок* отримані дані демонструють позитивний результат впровадження цього підходу, подальше дослідження логістичного підходу та його впровадження у навігаційну систему АНС дасть змогу зменшити енерговитрати у автономному надводному судні компактного класу. Розширення енергетичної моделі, а також урахування витрат на роботу сенсорної та навігаційної системи, дали змогу більш детально змодельовати всі енерговитрати в середині АНС.

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

ВСТУП

Роботизовані системи розвиваються та змінюються у наш час. Дистанційно керовані пристрої, дрони це важлива віха цього напрямку. Автономні надводні судна (АНС) це автоматизовані системи надводного типу, які можуть рухатись поверхнею води без прямої присутності людини на борту. З початку розробки перших зразків до сьогодні створено велика кількість варіантів які вирізняються розмірами, призначенням, типами пропульсивної установки та зоною застосування. Важливою віхою розвитку цієї великої галузі, є розробка АНС компактного класу, з електричною пропульсивною установкою для руху. Дослідження водних ресурсів наразі нерозривно пов'язано з застосуванням подібних суден. Використання новітніх рішень для контролю та навігації таких суден розширює діапазон їх можливостей та дозволяє використовувати АНС у різних гідрографічних місіях. Такі автономні судна можуть застосовуватись для широкого спектру задач, та завдяки досягненням у електроніці працювати на рівні з великими АНС, та отримувати і передавати великий обсяг даних, наприклад про стан забруднення води, батиметричний аналіз водного дна.

Важливою віхою цього напрямку є АНС компактного класу, які завдяки не великому розміру, та можливостями та технічним оснащенням мають велику популярність як серед користувачів так і серед розробників [1-3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Важливим аспектом використання автономних суден, є їх експлуатаційні характеристики. Серед них можна виокремити – транспортування та обслуговування судна, технічні можливості та оснащення, керування та інші. Але найбільше уваги приділяють питанню автономності, саме цей показник впливає на тривалість місії. Сформовано багато підходів до подолання цієї проблеми, але дослідники продовжують працювати над цим питанням. Покращення автономності АНС допоможе активно використовувати їх у подальших дослідженнях пов'язаних з водними ресурсами та покращить їх експлуатаційні характеристики.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Впровадження новітніх технологій в енергетичні системи автономних надводних суден (АНС) є важливою складовою розвитку сучасного водного транспорту. АНС як відомо є роботизованими системами, а тому проблеми енергоефективності притаманна мобільним роботам загалом. Існуючі підходи до підвищення енергоефективності розглядаються у роботах [4 – 6]. Автори формують різні методи до подолання цієї проблеми – зміни методики управління та удосконалення конструкції шляхом впровадження різних технічних рішень для збереження енергії.

Впровадження технічних засобів, зокрема використання апаратних частин з меншими енерговитратами, та використання більш ємних акумуляторів, в деяких випадках може мати ряд недоліків. Збільшення ємності акумуляторної батареї та використання загалом більших акумуляторів може негативно впливати на загальну вагу судна, та зменшує можливе корисне навантаження, та як результат енерговитрати на рух такого судна зростають. Це також принципово коли розробник обмежений розмірами корпусу.

Енергетична система Автономного надводного судна складається з кількох базових компонентів: джерела живлення – батареї, системи управління розподілу енергії – двигуни, системи навігації, комунікації.

У минулій роботі автора [7] розглядається метод оптимізації саме процесу руху АНС, шляхом впровадження вимог до руху автономного судна під час виконання завдань з гідрографічного моніторингу. В роботі проведено моделювання ситуацій руху за стандартними маршрутами які використовуються у гідрографічному моніторингу, та проаналізовано залежність витрат енергії від руху. Але під час формування енергетичної моделі, враховувались не всі енергетичні витрати. Тому подальша робота сфокусується на розвитку цього підходу, та розширенню енергетичної моделі, яка дасть змогу більш точно промодельовати вплив логістичного методу на підвищення енергоефективності.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Дана стаття фокусується на продовженні аналізу енергетичної системи АНС, покращення загальної структурної моделі та дослідженню результатів впливу логістичного методу. Для досягнення цієї мети буде виконане математичне моделювання та розрахунки у програмному комплексі MATLAB. На основі проведеного моделювання та аналізу енергетичних параметрів АНС дослідити ефективність використання логістичного підходу до руху автономного надводного судна, після розширення енергетичної моделі.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

У дослідженнях моделі енергоспоживання науковці зосереджуються на однокомпонентній оптимізації енергоспоживання, яке спрямовано на конкретний структурний елемент енергетичної системи. На думку автора, розглядати енерговитрати АНС необхідно в комплексі, тому що кожна частина енергетичної системи впливають на загальні витрати, і оптимізувати їх потрібно разом.

Подальше дослідження впровадження логістичного методу, вимагає звернути увагу на сформованій базовій енергетичній моделі у роботі [7], яка розділяє АНС на 3 основні компоненти – система руху, система керування та сенсорну систему. Основна спожита потужність у цій енергетичній системі витрачається на систему руху, а саме безколекторний

електродвигун та втрати які пов'язані з його роботою, інші витрати пов'язані з навігаційною та системою керування.

На основі цієї моделі, у цій роботі запропоновано розширити модель, яка буде фокусуватись також на навігаційній та сенсорній системі. Ці дві важливі системи які обмінюються сигналами під час роботи (Рис.1). Навігаційна система на основі отриманої інформації від сенсорної системи дає команди електродвигуну для руху.

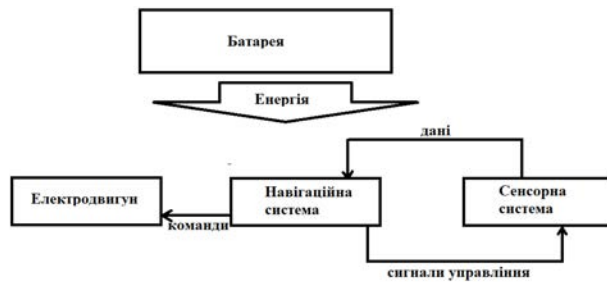


Рис. 1. Розширена схема енергетичної системи АНС

Енергоспоживання сенсорів можна вважати майже стабільним. Тому, енергоспоживання сенсорної системи множиться на електроенергію та час:

$$E_{\text{сенси}} = P_{\text{сенси}} \times t \quad (1)$$

де $E_{\text{сенси}}$ – споживання електроенергії, $P_{\text{сенси}}$ – це електрична потужність сенсорної системи.

Важливо зазначити, що робота сенсорної системи пов'язана зі швидкістю руху судна. В залежності від швидкості руху, сенсорна система може бути або в стані очікування, або обробляти інформацію про стан навколишнього середовища. Якщо АНС рухається з максимальною швидкістю, тоді сенсорна система працює безперервно. Тому, загальне енергоспоживання залежить від швидкості. Ця залежність демонструє, що сенсорна система в момент руху АНС та отримуючи дані про стан навколишнього середовища має сильний вплив на загальну витрату енергії.

$$E_{\text{сенси}} = \frac{1}{V_{\text{max}}} \int (V \times P_{\text{сенси}}) \times dt \quad (2)$$

У цьому рівнянні ми враховуємо що V_{max} максимальна швидкість руху АНС. Для збільшення енергозбереження врахування роботи сенсорної системи дасть змогу з одного боку підвищити точність аналізу, а з іншого в загальному результаті збільшити ефективність всієї системи.

Розглядаючи систему руху, в ролі якої є безколекторний електродвигун, та регулятор обертів, важливо зазначити що у цьому випадку йде найбільше використання енергії. Процес руху, в момент якого працює електродвигун, розділити на три етапи: стан очікування, початок роботи та рух. У момент стану очікування витрата енергії мінімальна. На етапі початку руху, необхідно забезпечити імпульс для

запуску електродвигуна. Та в момент руху, двигун використовує більше енергії для забезпечення заданої швидкості. Формула енергоспоживання системи руху, матиме наступний вигляд (3):

$$E_{\text{руху}} = (P_{\text{очікування}} \times t_{\text{очікування}}) + E_{\text{старт}} + (P_{\text{руху}} \times t_{\text{руху}}) \quad (3)$$

де $E_{\text{руху}}$ – це загальна витрата енергії, яка використовується АНС для руху, $P_{\text{очікування}}$ – потужність в стані очікування, $t_{\text{очікування}}$ – час у стані очікування. Витрати енергії на етап початку руху $E_{\text{старт}}$ знаходиться за формулою (4):

$$E_{\text{старт}} = P_{\text{старт}} \times t_{\text{старт}} \quad (4)$$

Витрати енергії навігаційної системи базуються на енерговитратах основного мікроконтролера, які в свою чергу пов'язані зі станом самого судна. Також слід враховувати надсилання інформації на пункт управління під час роботи судна. В попередньому дослідженні, обмін даними між сенсорною системою та навігаційною системою не враховувався, в цьому випадку необхідно додати, що певна витрата енергії теж присутня. Енерговитрати буде поділено: на витрати у стані очікування, витрати на початок роботи, та коли АНС рухається і відбувається постійна комунікація з пунктом управління та обмін сигналами з сенсорною системою (5):

$$E_{\text{наві}} = \begin{cases} E_{\text{очікування}} = P_{\text{очікування}} \\ E_{\text{старт}} = \int \left(\phi \times \delta V + \left(\frac{t^2}{10} \right) + P_{\text{очікування}} \right) dt \\ E_{\text{роботи}} = \int (P_{\text{очікування}} + t^2) dt \end{cases} \quad (5)$$

де $P_{\text{очікування}}$ – це потужність навігаційної системи у стані очікування. Система приймає сигнали від сенсорів поки знаходиться у стані очікування.

Загальна модель енергетичних витрат АНС складається з сенсорної системи, навігаційної системи та системи руху. В загальному вигляді, ці три системи нерозривно пов'язані між собою, та для розрахунку загальних енерговитрат $E_{\text{загальне}}$ розраховується як сума витрат на очікування, стан руху, та витрати енергії сенсорної та навігаційної систем (6):

$$E_{\text{загальне}} = E_{\text{руху}} + E_{\text{очікування}} + E_{\text{наві}} + E_{\text{сенси}} \quad (6)$$

Зазначені вирази (1-6), дозволяють розширити енергетичну модель автономного судна, додавши необхідні параметри навігаційної та сенсорної систем, та провести моделювання цієї моделі, для подальшого аналізу результату впровадження логістичного методу. Даний метод передбачає впровадження вимог до руху АНС, адже саме під час руху відбувається найбільша витрата енергії. Серед найбільших енерговитрат визначено енергію на рух, тому що в цей час електродвигун як найбільш ресурсний споживач енергії у системі працює. Попереднє дослідження, а саме симуляція руху автономного судна під час виконання гідрографічного

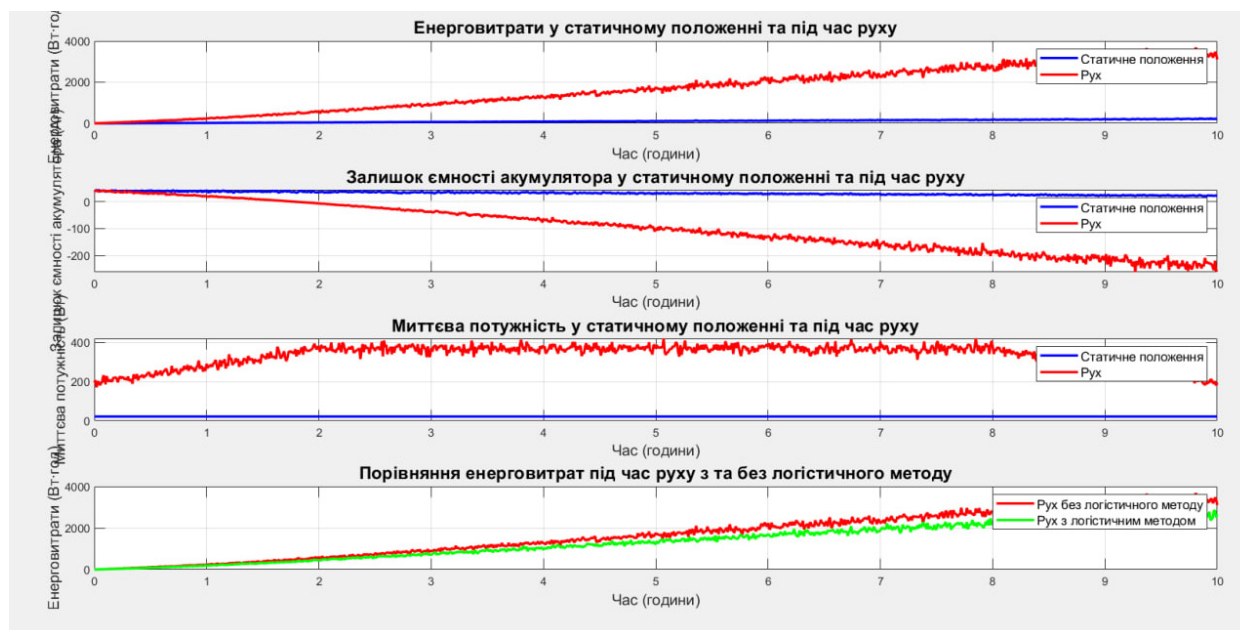


Рис. 2. Результат використання логістичного методу в оновленій енергетичній моделі АНС

моніторингу дала змогу сформувати логістичні критерії оптимальності руху, які вимагають дотримання середньо-оптимальної швидкості руху, плавності, та виключення різких змін напрямку руху під час виконання завдань. Дані критерії додаються моделювання. Логістичний метод підвищення енергоефективності судна функціонує як алгоритм, який спрямований на зменшення енерговитрат судна.

Оновлена енергетична модель побудована у програмному комплексі MATLAB, та додано логістичний метод для аналізу впливу на підвищення енергоефективності. Побудовано графіки результатів побудови з використанням логістичного методу та без (рис. 2).

Графік на рис. 3 демонструє вплив логістичного методу на підвищення енерговитрат за проміжок часу.

ВИСНОВКИ

Продовжено дослідження питання підвищення енергоефективності автономного надводного судна з електричною пропульсивною установкою. Завдяки програмному комплексу MATLAB промодельовано енергетичну модель АНС. Результати проведеного дослідження демонструють позитивний результат впровадження логістичного підходу для підвищення

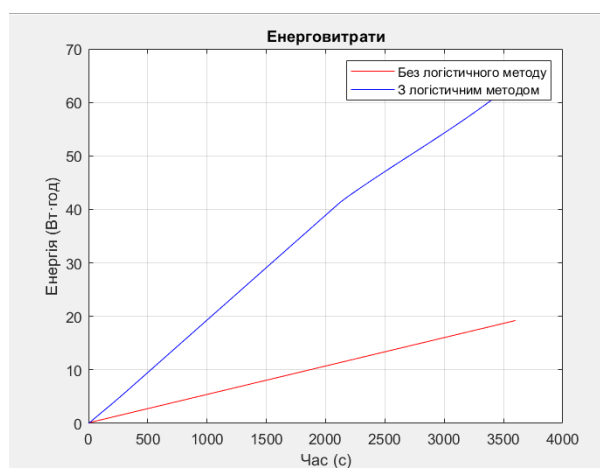


Рис. 3. Енерговитрати судна з використанням логістичного методу та без

енергоефективності автономного надводного судна. Розширення енергетичної моделі, а також урахування витрат на роботу сенсорної та навігаційної системи, дали змогу більш детально змодельовати всі енерговитрати в середині АНС.

REFERENCES

- [1] Sotelo-Torres F, Alvarez LV, Roberts RC. (2023). An Unmanned Surface Vehicle (USV). Development of an Autonomous Boat with a Sensor Integration System for Bathymetric Surveys. *Sensors* (Basel). 23, pp 4420 .
- [2] Bolbot, V. Sandru, A. Saarniniemi, T. Puolakka, O. Kujala, P. Valdez Banda, O.A. (2023). Small Unmanned Surface Vessels—A Review and Critical Analysis of Relations to Safety and Safety Assurance of Larger Autonomous Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*. 11, pp 2387. 10.3390/jmse11122387.
- [3] Chaysri P, Spatharis C, Vlachos K, Blekas K. (2024). Design and Implementation of a Low-Cost Intelligent Unmanned Surface Vehicle. *Sensors* (Basel). 24, pp 3254. 10.3390/s24103254.

- [4] Verstraten T., Furnémont R., Mathijssen G., Vanderborght B., Lefeber D. (2016). Energy Consumption of Geared DC Motors in Dynamic Applications: Comparing Modeling Approaches. *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 1, pp 524–530, doi: 10.1109/LRA.2016.2517820.
- [5] Haidegger T, Kovács L, Precup R, Benyó B, Benyó Z, Preitl S, (2012). Simulation and control for telerobots in space medicine. *Acta Astronautica*. 81, pp 390–402. 10.1016/j.actaastro.2012.06.010.
- [6] Hou L, Zhang L, Kim J. (2018). Energy Modeling and Power Measurement for Mobile Robots. *Energies*. 12, pp 27. 10.3390/en12010027.
- [7] Yermolenko B. O. (2024). Optimizatsia rukhy avtonomnoho nadvodnoho sudna na electrychniy tyazi yak shlyakh pidvyshchennya enerhoefektyvnosti. [Optimizing the movement of an autonomous surface vessel on electric trust as a way to increase energy efficiency]. *Zbirka naukovykh prats NUOS*. 1(494), pp 80–86. DOI: 10.15589/zn2024.1(494).11

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Sotelo-Torres F, Alvarez LV, Roberts RC. (2023). An Unmanned Surface Vehicle (USV): Development of an Autonomous Boat with a Sensor Integration System for Bathymetric Surveys. *Sensors (Basel)*. 23, pp 4420 .
- [2] Bolbot, V. Sandru, A. Saarniniemi, T. Puolakka, O. Kujala, P. Valdez Banda, O.A. (2023). Small Unmanned Surface Vessels—A Review and Critical Analysis of Relations to Safety and Safety Assurance of Larger Autonomous Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*. 11, pp 2387. 10.3390/jmse11122387.
- [3] Chaysri P, Spatharis C, Vlachos K, Blekas K. (2024). Design and Implementation of a Low-Cost Intelligent Unmanned Surface Vehicle. *Sensors (Basel)*. *Sensors*. 24, pp 3254. 10.3390/s24103254.
- [4] Verstraten T., Furnémont R., Mathijssen G., Vanderborght B., Lefeber D. (2016). Energy Consumption of Geared DC Motors in Dynamic Applications: Comparing Modeling Approaches. *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 1, pp 524–530, doi: 10.1109/LRA.2016.2517820.
- [5] Haidegger T, Kovács L, Precup R, Benyó B, Benyó Z, Preitl S, (2012). Simulation and control for telerobots in space medicine. *Acta Astronautica*. 81, pp 390–402. 10.1016/j.actaastro.2012.06.010.
- [6] Hou L, Zhang L, Kim J. (2018). Energy Modeling and Power Measurement for Mobile Robots. *Energies*. 12, pp 27. 10.3390/en12010027.
- [7] Єрмоленко Б. (2024). Оптимізація руху автономного надводного судна на електричній тязі як шлях підвищення енергоефективності. *Збірник наукових праць НУК*. 1(494), с. 80–86. DOI: 10.15589/zn2024.1(494).11

© Єрмоленко Б. О.

Дата надходження статті до редакції: 26.06.2024

Дата затвердження статті до друку: 12.07.2024