

## МІНІМІЗАЦІЯ ВИТРАТ ПАЛИВА ПРИ ВИКОНАННІ ОПЕРАЦІЙ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

Зінченко С.М., Кириченко К.В., Поліщук В.О., Корнелюк О.М.  
Херсонська державна морська академія  
(Україна)

**Вступ.** Питання зменшення споживання енергії та палива на судні, а також супутні питання зменшення викидів та покращення навколишнього середовища є особливо актуальними на сьогодні [1]. Шляхи вирішення цих питань різні, але найчастіше для цього використовуються конструктивні рішення [2], гідродинамічні рішення [3], вітрила [4] або вдосконалені силові енергетичні установки. Оптимізація руху та економія палива також можлива завдяки правильному плануванню маршруту, психологічній підготовці екіпажу, використанню систем підтримки прийняття рішень, ергатичних [5] або автоматизованих систем з автоматичними модулями керування [13-27]. На думку авторів, найбільш перспективним напрямком на найближчі 10-15 років, до появи повністю роботизованих суден, є розробка та впровадження автоматизованих систем з автоматичними модулями керування. Функції людини в таких системах зводяться лише до запуску автоматичного модуля та спостереження за його роботою, що значно зменшує частку ручного керування судном, вплив людського чинника на процеси керування, сприяє зменшенню кількості аварій та катастроф [6]. Прикладом автоматичного модуля у автоматизованій системі, який використовується майже на всіх судах, є автопілот. На судах із системами динамічного позиціонування (DP-systems) модулі автоматичного керування також знайшли широке застосування. До складу DP-system входять надлишкові структури активного керування, які використовуються для резервування. У керівництві користувача [7] описані три сучасні системи динамічного позиціонування: Navis, Marine Technologies та Rolls Royce.

Оптимальні керування та надлишкові структури використовуються у різних галузях народного господарства, а саме: авіаційній [8], космічній [9], судновій [10] та інших [11, 12].

**Актуальність дослідження.** Із зазначеного вище видно, що надлишкові структури керування широко використовуються у різних галузях народного господарства. Разом з тим, авторами не знайдені відомі рішення для автоматизованих систем керування рухом суден, які дозволили б зменшити енергоспоживання за рахунок використання надлишковості керування. Тому, розробка методів, алгоритмічного і програмного забезпечення модулів автоматичного оптимального керування судном з надлишковими структурами виконавчих пристроїв є актуальною науково – технічною задачею.

**Постановка задачі.** На рис. 1 наведена схема надлишкового керування судном OSV3.

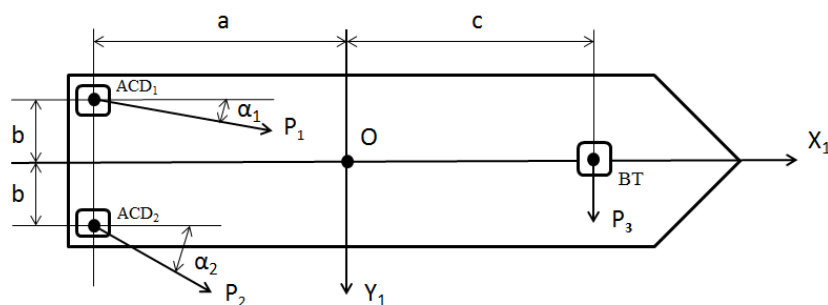


Рисунок 1 – Схема надлишкового керування судном OSV3

Надлишкова структура керування включає перший азимутальний пристрій ACD1, другий азимутальний пристрій ACD2, та носовий підрулюючий пристрій ВТ. Перший азимутальний пристрій ACD1 створює вектор сили упору гвинта  $\mathbf{P}_1 = (P_1 \cos \alpha_1, P_1 \sin \alpha_1, 0)$  та має обмеження на керування  $-P_{ACD}^{\max} \leq |\mathbf{P}_1| \leq P_{ACD}^{\max}, -\pi \leq |\alpha_1| \leq \pi$ . Другий азимутальний пристрій ACD2 створює вектор сили упору гвинта  $\mathbf{P}_2 = (P_2 \cos \alpha_2, P_2 \sin \alpha_2, 0)$  та має обмеження на керування  $-P_{ACD}^{\max} \leq |\mathbf{P}_2| \leq P_{ACD}^{\max}, -\pi \leq |\alpha_2| \leq \pi$ . Носовий підрулюючий пристрій ВТ створює бокову силу  $\mathbf{P}_3 = (0, P_3, 0)$  та має обмеження на керування  $-P_{BT}^{\max} \leq |\mathbf{P}_3| \leq P_{BT}^{\max}$ .

Потрібно розробити метод, алгоритмічне та програмне забезпечення автоматичного модуля керування, які забезпечили б мінімізацію енерговитрат на підтримування заданої позиції судна при проведенні динамічного позиціонування.

**Результати дослідження.** Математична модель наведеної на рис. 1 структури має вигляд

$$\begin{cases} P_x = P_1 \cos \alpha_1 + P_2 \cos \alpha_2 \\ P_y = P_1 \sin \alpha_1 + P_2 \sin \alpha_2 + P_3 \\ M_z = P_1 b \cos \alpha_1 - P_2 b \cos \alpha_2 - P_1 a \sin \alpha_1 - P_2 a \sin \alpha_2 + P_3 c \end{cases}, \quad (1)$$

Цільова функція, що забезпечує мінімальні енерговитрати, має вигляд

$$Q(P_1, P_2, P_3) = P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

Обмеження на керування представлені системою (3)

$$\begin{cases} -P_{ACD}^{\max} \leq |\mathbf{P}_1| \leq P_{ACD}^{\max} \\ -\pi \leq |\alpha_1| \leq \pi \\ -P_{ACD}^{\max} \leq |\mathbf{P}_2| \leq P_{ACD}^{\max} \\ -\pi \leq |\alpha_2| \leq \pi \\ -P_{BT}^{\max} \leq |\mathbf{P}_3| \leq P_{BT}^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

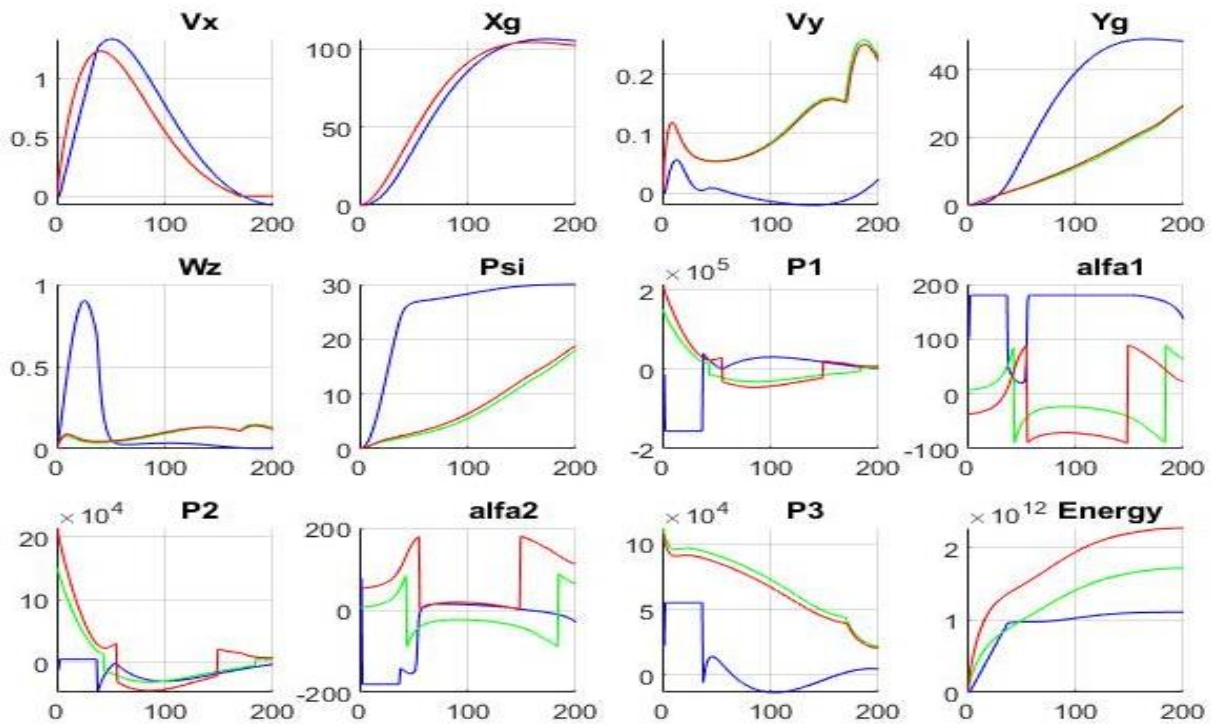
Для знаходження оптимальних параметрів керувань  $P_1, \alpha_1, P_2, \alpha_2, P_3$ , що мінімізують цільову функцію (2), за наявності нелінійних (1) та лінійних (3) обмежень, використана оптимізаційна процедура, подібна `fmincon` (\*) MATLAB

$$\text{fmincon}(@\text{fun}, \mathbf{x0}, \mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{Aeq}, \mathbf{beq}, \mathbf{lb}, \mathbf{ub}, @\text{nonlcon}). \quad (4)$$

Сумарні сили  $P_x, P_y$  та момент  $M_z$ , що використовуються в обмеженнях (1), визначаються за допомогою ПДД – регулятора

$$\begin{cases} P_x = k_1(X_g - X_g^*) + k_2(V_x - V_x^*) + k_3 \int (X_g - X_g^*) dt \\ P_y = k_4(Y_g - Y_g^*) + k_5(V_y - V_y^*) + k_6 \int (Y_g - Y_g^*) dt \\ M_z = k_7(\varphi - \varphi^*) + k_8(\omega_z - \omega_z^*) + k_9 \int (\varphi - \varphi^*) dt \end{cases} \quad (5)$$

Оптимізаційна процедура (4) та визначення параметрів  $P_x, P_y, M_z$ , із використанням ПД – регулятора (5), виконується на кожному кроці обчислення.



Результати моделювання процесів динамічного позиціонування із цільовою функцією (2) наведені на рис.2 (сині графіки).

Рисунок 2 – Результати моделювання процесів динамічного позиціонування із цільовою функцією  $Q(P_1, P_2, P_3) = P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 \rightarrow \min$

Для порівняння, червоним та зеленим кольором зображені графіки процесів двох не оптимальних схем керування: схеми рівновекторного керування та схеми рівномодульного керування з ортогональними векторами. На графіках Energy(t) представлені інтеграли цільової функції (2) у часі. Як видно із даного графіку, оптимальне керування (синій графік) дозволяє зменшити енерговитрати на (35-50)%, у порівнянні з неоптимальними схемами керування.

**Висновки.** Розроблено метод оптимального керування офшорним судном із надлишковою структурою двох кормових азиподів і носовим підрюлюючим пристроєм, на відміну від існуючих методів забезпечує мінімізацію енерговитрат на проведення операцій динамічного позиціонування;

розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення модулів автоматичного керування у автоматизованій системі, що використовують даний метод;

працездатність та ефективність методу, алгоритмічного і програмного забезпечення перевірені математичним моделюванням у середовищі MATLAB. Результати моделювання підтвердили зменшення енергоспоживання на (35-50)%.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Vidoza J.A., Andreasen J. G., Haglind F., Reis M., Gallo W. Design and optimization of power hubs for Brazilian off-shore oil production units. Energy. 2019. Vol. 176 (1). P.656-666. DOI: 10.1016/j.energy.2019.04.022
2. Kai Li, Yanyun Yu, Yunlong Wang, Zhenwu Hu. Research on structural optimization method of FRP fishing vessel based on artificial bee colony algorithm. Advances in Engineering Software. 2018. Vol. 121. P. 250-261. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2018.03.011

3. Feng Y., Chen Z., Dai Yi, Wang F., Cai J., Shen Z. Multidisciplinary optimization of an offshore aquaculture vessel hull form based on the support vector regression surrogate model. *Ocean Engineering*. 2018. Vol.166. P.145-158. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.062
4. Ma Y., Bi H., Hu M., Zheng Y., Gan L. Hard sail optimization and energy efficiency enhancement for sail-assisted vessel, *Ocean Engineering*, 2019. Vol. 173 (1). P. 687-699. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.026
5. Nosov Pavlo, Zinchenko Serhii, Plokhikh Victor, Popovych Ihor, Prokopchuk Yurii, Makarchuk Dmytro, Mamenko Pavlo, Moiseienko Vladyslav, Ben Andrii. Development and experimental study of analyzer to enhance maritime safety. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, Vol. 4, No. 3(112): Control processys, P. 27-35
6. Luo M., Shin S. Half-century research developments in maritime accidents: Future directions. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, Vol. 123, P. 448-460. DOI: 10.1016/j.aap.2016.04.010
7. Navi – Trainer 5000. Transas offshore simulator. Instructor manual. Transas MIP Ltd. 2012.
8. Xin Bao, Chao Jiang. Time-Optimal Control Algorithm of Aircraft Maneuver. In book: *Advances in Guidance, Navigation and Control*, Proceedings of 2022 International Conference on Guidance, Navigation and Control, 2023. DOI: [10.1007/978-981-19-6613-2\\_454](https://doi.org/10.1007/978-981-19-6613-2_454)
9. Leparoux Clara, Herisse Bruno, Jean Frédéric. Structure of optimal control for planetary landing with control and state constraints. *ESAIM Control Optimisation and Calculus of Variations*, 2022, Vol. 28. DOI: 10.1051/cocv/2022065
10. Huang W., Xu H., Wang J., Miao C., Ren Y., Wang L. Redundancy Management for Fault-tolerant Control System of an Unmanned Underwater Vehicle. 5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE): Proceedings, China, 19-20 Sept. 2020. DOI: 10.1109/CACRE50138.2020.9230038
11. Xin Cheng, Shuai Deng, Baixin Cheng, Lu Meiqian, Rougang Zhou. Optimization of bias current coefficient in the fault-tolerance of active magnetic bearings based on the redundant structure parameters, *Automatika*, 2020, Vol. 61(4), P. 602-613. DOI: 10.1080/00051144.2020.1806012
12. Li W., Shi G. Redundancy management strategy for electro-hydraulic actuators based on intelligent algorithms. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020. DOI: 10.1177/1687814020930455
13. Zinchenko S. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O., Mateichuk V. M. Automatic control of the vessel's movement under external conditions // *Науковий вісник ХДМА*, №2(21), 2019. – с. 10-15. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/480/416>
14. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г., Шалаева А.А. Расчет и реализация маневра расхождения с судами целями в бортовой ЦВМ // *Матеріали IV МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві освіта, наука, практика»*, Херсон, 14-16 вересня 2017р., с.230-235
15. Зинченко С. Н., Ляшенко В. Г. Использование нейросетевой модели судна для решения задач управления // *Науковий вісник ХДМА* №2 (17), с. 231-237, 2017. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>
16. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г., Шалаева А.А. Оценка маневренных возможностей судна с помощью нейросетевой модели, синтезируемой в процессе его штатной эксплуатации // *Матеріали IV МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті а виробництві освіта, наука, практика»*, Херсон, 14-16 вересня 2017р., с.236-240
17. Зинченко С. Н., Ляшенко В. Г., Грошева О. А. Синтез оптимального управления судном с граничными условиями // *Науковий вісник ХДМА* №1(18), 2018 <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440>
18. Зинченко С.М., Матейчук В.М., Ляшенко В.Г. Використання інформаційних систем моделювання для розробки та тестування систем автоматичного керування рухом

судна // Матеріали V МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті а виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 13-15 вересня 2018 р., с.27-29

19. Зинченко С.Н., Маменко П.П., Грошева О.А. Сокращение времени численного интегрирования математической модели судна в бортовом вычислителе // Науковий вісник ХДМА №1(18), 2018.  
<http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/526/469>

20. Зинченко С. Н., Ляшенко В. Г., Грошева О. А. Оптимальное управление избыточными структурами аzipодов // Матеріали V МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 13-15 вересня 2018 р., с.78-81

21. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г. Расхождение с маневрирующими целями // Науковий вісник ХДМА №2 (17), с. 36-43, 2017.  
<http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/555/499>

22. Зинченко С.Н., Носов П.С., Маменко П.П., Грошева О.А., Матейчук В.Н. Использование математической модели ЧЭ гирокомаса для учета инерционной девиации // Матеріали VI МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 11-14 вересня 2019, с. 203 – 206

23. Zinchenko Serhii, Tovstokoryi Oleh, Nosov Pavlo, Popovych Ihor & Kyrychenko Kostiantyn. Pivot Point position determination and its use for manoeuvring a vessel, Ships and Offshore Structures, 2022, DOI: 10.1080/17445302.2022.2052480

24. Zinchenko S., Tovstokoryi O. What is the pivot point and how to use it to control the vessel. Materials of the XII International Scientific and Practical Conference "Advanced Information and Innovative Technologies for Transport (MINTT - 2020), May 27-29, 2020, Kherson.

25. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Nosov P, Popovych I., Kobets V., Abramov G. Mathematical support of the vessel information and risk control systems. CEUR Workshop Proceedings, 2805, P. 335-354, 2020. <http://ceur-ws.org/Vol-2805/paper25.pdf>

26. Moiseenko V.S., Zinchenko S.M., captain Tovstokoryi O.M. Automatic beam control of laser–optical position reference system // Materials of the II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of Power Plants and TE of Odessa National Maritime University MPP & O-2020, April 2020, ODESSA-ISTANBUL-ODESSA.  
<https://drive.google.com/file/d/1HEX2RVuA1KV5JjMfQcqYZ1f4SCFMcy6a/view>

27. Zinchenko S. Study of a minimally excessive complanary control structure with two azimuth control devices. Materials of the VII International Scientific and Practical Conference "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice", Kherson, September 9-12, 2020, p.319-325