Волянський Сергій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, ORCID: 0000-0001-7922-0441.

Добровольська Ліана Олегівна, асистент кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, ORCID: 0009-0000-1330-4087 .

Козачук Антон Вікторович, Одеський національний морський університет, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, ORCID: 0009-0001-3155-0983.

Volyanskiy Serhii, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering of Ship and Robotic Complexes, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, ORCID: 0000-0001-7922-0441.

Dobrovolska Liana, Assistant Professor, Department of Navigation and Maritime Safety, Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine, ORCID: 0009-0000-1330-4087.

Kozachuk Anton, Odessa National Maritime University, Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine, ORCID: 0009-0001-3155-0983.

СПРОЩЕНА 3-DOF ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНОЮ МОРСЬКОЮ ПЛАТФОРМОЮ В УМОВАХ ХВИЛЬОВИХ ПЕРЕШКОД

SIMPLIFIED 3-DOF DYNAMIC MODEL FOR CONTROLLING AN AUTONOMOUS MARITIME PLATFORM IN WAVY CONDITIONS

Анотація

У статті розглянуто задачу підвищення стійкості та точності керування автономною морською платформою в умовах хвильових збурень. Для опису динаміки використано спрощену нелінійну модель руху у трьох ступенях вільності (3-DOF), що враховує інерційні, коріолісові та демпфувальні впливи. Зовнішні морські збурення моделюються у вигляді гармонічного впливу, характерного для помірного стану моря. Запропоновано робастну схему керування з додатковим демпфувальним зворотним зв’язком та проведено її порівняння з класичним пропорційним регулятором. Результати чисельного моделювання демонструють зменшення амплітуди коливань, підвищення швидкості збіжності та покращення якості відпрацювання заданих траєкторій. Отримані результати можуть бути використані при розробці систем експлуатаційного керування автономними морськими технічними засобами.

Ключові слова: автономна морська платформа; 3-DOF модель; хвильові збурення; робастне керування; морська динаміка; компенсація збурень.

Abstract

The article considers the problem of improving the stability and accuracy of autonomous marine platform control in wave conditions. A simplified nonlinear three-degree-of-freedom (3-DOF) motion model that takes into account inertial, Coriolis, and damping effects is used to describe the dynamics. External sea disturbances are modeled as a harmonic effect characteristic of moderate sea conditions. A robust control scheme with additional damping feedback is proposed and compared with a classic proportional controller. The results of numerical modeling demonstrate a decrease in the amplitude of oscillations, an increase in the convergence rate, and an improvement in the quality of the

specified trajectories. The results obtained can be used in the development of operational control systems for autonomous marine technical means.

Keywords: maritime autonomous platform; 3-DOF model; wave disturbance; robust control; marine dynamics; disturbance rejection.

Постановка проблеми. Ефективне функціонування автономних морських технічних засобів (АМТЗ) значною мірою залежить від здатності підтримувати стабільні режими руху в умовах невизначеності зовнішнього середовища.

Одним із ключових факторів, що впливають на динаміку руху морських платформ, є хвильові збурення, які спричиняють коливальні процеси та знижують точність відпрацювання керуючих сигналів. Традиційні лінійні регулятори не завжди забезпечують достатній рівень стійкості при змінних параметрах середовища та нелінійній гідродинаміці.

У зв’язку з цим актуальною є розробка спрощених, але адекватних математичних моделей автономних морських платформ, які дозволяють аналізувати вплив зовнішніх збурень та оцінювати ефективність різних стратегій керування.

Метою даної роботи є побудова спрощеної нелінійної 3-DOF моделі автономної морської платформи та дослідження ефективності робастної схеми керування в умовах гармонічного хвильового збурення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження у сфері автономних морських технічних засобів охоплюють широкий спектр задач від візуального спостереження до кооперативного керування та багатосенсорної інтеграції. Зокрема, Zhang et al. (2017) розглядають методи виявлення суден з рухомих платформ, що є важливим для навігаційної автономії. Bose et al. (2025) аналізують перспективні бездротові технології морського зв’язку, підкреслюючи роль стабільних каналів передачі даних

для автономних систем.

Питання безпечного планування траєкторії автономних надводних суден досліджуються у роботі Song et al. (2024), де запропоновано інтеграцію ситуаційних карт знань із динамічним алгоритмом вікна. Кооперативне керування морськими безпілотними системами, зокрема у зв'язці UAV–USV, розглядається у Zhang et al. (2025), що демонструє зростання інтересу до мультиагентних морських систем.

Важливим напрямом є сенсорна інтеграція та системи сприйняття навколишнього середовища (Lu et al., 2025), а також дослідження взаємодії людина–машина в автономному судноплавстві (Liu et al., 2022), а деякі окремі роботи присвячені системам екологічного моніторингу та безпеки, зокрема виявленню розливів нафти та пожеж (Kim et al., 2025).

Таким чином незважаючи на активний розвиток алгоритмів сприйняття, навігації та кооперативного керування, питання робастного керування динамікою автономних морських платформ в умовах хвильових збурень залишаються актуальними та потребують подальших досліджень.

Мета статті. Метою даної роботи є розроблення та дослідження спрощеної нелінійної динамічної моделі автономної морської платформи з урахуванням хвильових збурень та оцінювання ефективності робастної схеми керування порівняно з класичним пропорційним регулятором. Для досягнення поставленої мети передбачено формалізацію 3-DOF моделі руху платформи у площині, введення гармонічної моделі зовнішнього хвильового впливу та синтез двох варіантів керування з проведенням чисельного моделювання та порівняльного аналізу показників якості.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Математична модель руху. Розглядається рух автономної морської платформи у горизонтальній площині з трьома ступенями вільності: поздовжній рух (surge), поперечний рух (sway) та обертання навколо

вертикальної осі (yaw).

Вектор швидкостей має вигляд:

$$\nu = [u \;\; v \;\; r]^T, \qquad (1)$$

де u - поздовжня швидкість, v - поперечна швидкість, r - кутова швидкість рискання.

Динаміка системи описується рівнянням:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D\nu = \tau + \tau_w, \qquad (2)$$

де M - матриця інерції; $C(\nu)$ - матриця коріолісових та центробіжних сил; D - матриця гідродинамічного демпфування, τ - вектор керуючих впливів; τ_w - вектор зовнішніх збурень.

Для спрощеного чисельного аналізу використано діагональні форми матриць M та D, що дозволяє зосередитися на впливі хвильового збурення та структури регулятора.

Зовнішній вплив середовища моделюється гармонічною функцією:

$$\tau_w(t) = A_w \sin(\omega_w t), \qquad (3)$$

де A_w - амплітуда хвильового навантаження; ω - частота хвилі.

Такий підхід дозволяє імітувати періодичні збурення, характерні для помірного стану моря.

Синтез системи керування. Для оцінювання впливу структури регулятора розглянуто дві схеми керування, а саме: класичне пропорційне керування

$$\tau = K_p(\nu_{ref} - \nu), \qquad (4)$$

та робастна схема з демпфувальним зворотним зв’язком

$$\tau = K_p(\nu_{ref} - \nu) - K_d\dot{\nu}. \qquad (5)$$

Додатковий демпфувальний член забезпечує підвищену стійкість системи до періодичних збурень та зменшення амплітуди коливань.

Якість керування оцінюється за такими показниками як амплітуда усталених коливань, час перехідного процесу та інтегральна похибка відстеження з величиною керуючого впливу.

Порівняльний аналіз результатів чисельного моделювання дозволяє оцінити ефективність запропонованого підходу в умовах хвильових навантажень.

На рисунку 1 представлено зміну поздовжньої швидкості $u(t)$) при використанні класичної та робастної схем керування де робастний регулятор забезпечує зменшення амплітуди коливань і швидшу стабілізацію режиму руху в умовах періодичного збурення.

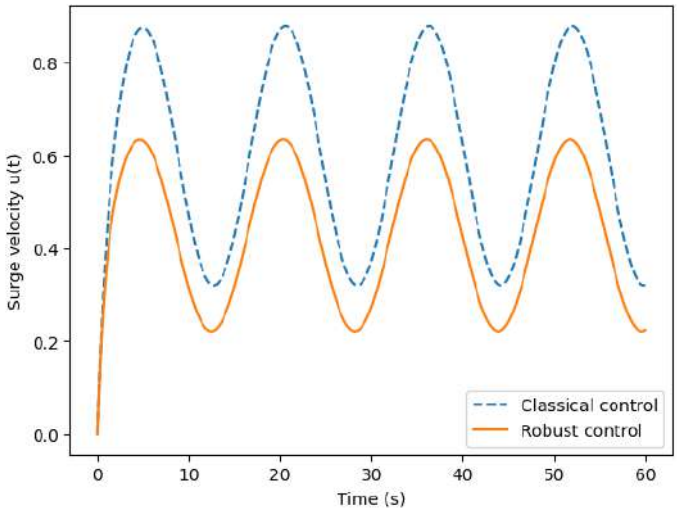


Рисунок 1. Динаміка поздовжньої швидкості автономної морської платформи під дією хвильового збурення

Графік на рисунку 2 відображає динаміку похибки $e_u(t)$ для двох стратегій керування де робастна схема демонструє зниження усталеної похибки та покращену компенсацію періодичних збурень порівняно з класичним регулятором.

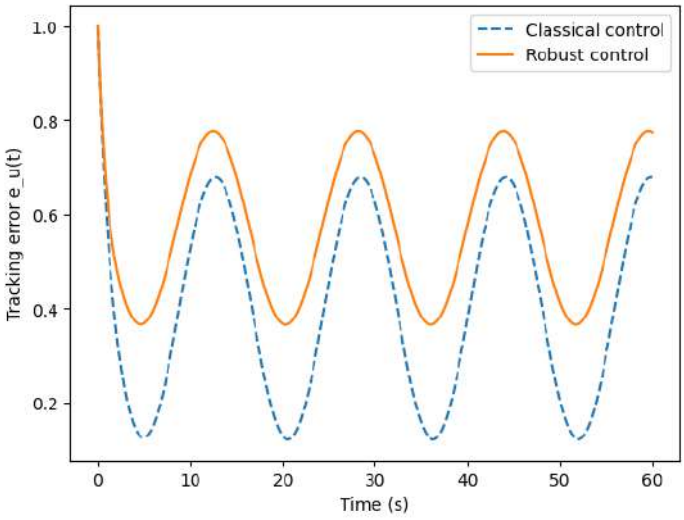


Рисунок 2. Похибка відстеження швидкості в умовах хвильового впливу

На рисунку показано часову залежність керуючого сигналу $\tau_u(t)$. Робастний підхід характеризується більш ефективним формуванням керуючого впливу для придушення хвильових коливань без істотного зростання енергетичних витрат.

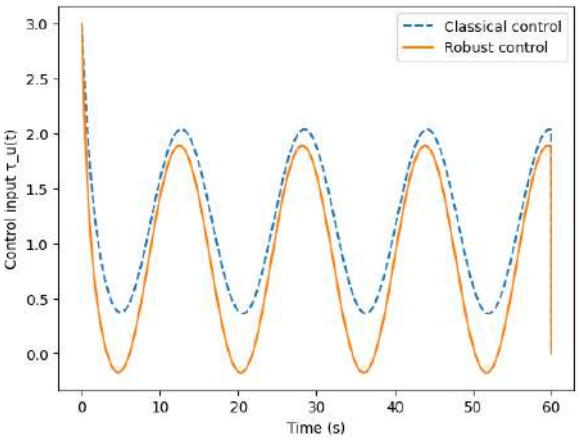


Рисунок 3. Керуючий вплив у каналі поздовжнього руху

Обговорення результатів. Отримані результати чисельного моделювання підтверджують суттєвий вплив хвильових збурень на динамічні характеристики автономної морської платформи. При застосуванні класичного пропорційного регулятора спостерігаються

усталені коливання швидкостей та підвищена амплітуда похибки відстеження, що зумовлено періодичним характером зовнішнього збурення.

Використання робастної схеми керування з додатковим демпфувальним зворотним зв’язком забезпечує більш швидке затухання перехідних процесів та зменшення амплітуди коливань у сталому режимі. Це свідчить про підвищену здатність системи компенсувати періодичні хвильові навантаження. Разом із тим, покращення показників стійкості системи супроводжується незначним збільшенням початкової величини керуючого впливу. Проте загальний рівень енергетичних витрат залишається прийнятним для автономних морських технічних засобів середнього класу.

Запропонована модель, незважаючи на спрощений характер, дозволяє відобразити ключові особливості взаємодії динаміки платформи з хвильовими збуреннями та може бути використана як базис для подальшого розширення з урахуванням нелінійних гідродинамічних коефіцієнтів та адаптивних алгоритмів керування.

Висновки. У роботі розроблено спрощену нелінійну 3-DOF модель автономної морської платформи з урахуванням гармонічного хвильового збурення. Проведено порівняльний аналіз класичної та робастної схем керування. Основні результати дослідження:

1. Хвильові збурення суттєво впливають на точність відстеження та стабільність руху платформи.

2. Додавання демпфувального зворотного зв’язку дозволяє зменшити амплітуду усталених коливань та скоротити тривалість перехідного процесу.

3. Робастна схема керування демонструє кращу компенсацію періодичних зовнішніх впливів без істотного зростання керуючих зусиль.

4. Запропонований підхід може бути використаний як основа для

розробки адаптивних та інтелектуальних систем експлуатаційного керування автономними морськими технічними засобами.

Список використаних джерел

1. Zhang, Y., Li, Q., & Zang, F. (2017). Ship detection for visual maritime surveillance from non-stationary platforms. *Ocean Engineering*, *141*, 53-63. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.022

2. Bose, P., Rafiq, G., & Orten, P. (2025). Maritime communications – A review of potential wireless communication technologies. *Ocean Engineering*, *341*, 122527. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122527

3. Song, R., Papadimitriou, E., Negenborn, R. R., & Gelder, P. V. (2024). Integrating situation-aware knowledge maps and dynamic window approach for safe path planning by maritime autonomous surface ships. *Ocean Engineering*, *311*, 118882. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118882

4. Zhang, Z., Liu, S., Wang, H., & Wu, H. (2025). A cooperative control framework for path following of UAV-USV cooperative system in maritime scenarios. *Ocean Engineering*, *342*, 122796. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122796

5. Lu, H., Zhang, Y., Zhang, C., Niu, Y., Wang, Z., & Zhang, H. (2025). A multi-sensor fusion approach for maritime autonomous surface ships berthing navigation perception. *Ocean Engineering*, *316*, 119965. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119965

6. Liu, C., Chu, X., Wu, W., Li, S., He, Z., Zheng, M., Zhou, H., & Li, Z. (2022). Human–machine cooperation research for navigation of maritime autonomous surface ships: A review and consideration. *Ocean Engineering*, *246*, 110555. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110555

7. Kim, H., Pal, A., Cho, J., Al-Kabbany, A. M., Kaswan, K., Joshi, R., Na, S., Lee, J., Choi, K., Kim, M., Choi, D., & Lin, Z. (2025). Thermochromic

fiber-based self-powered detection system for maritime oil spill monitoring and fire safety applications. *Nano Energy*, *147*, 111569. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2025.111569

References

1. Zhang, Y., Li, Q., & Zang, F. (2017). Ship detection for visual maritime surveillance from non-stationary platforms. *Ocean Engineering*, *141*, 53-63. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.022

2. Bose, P., Rafiq, G., & Orten, P. (2025). Maritime communications – A review of potential wireless communication technologies. *Ocean Engineering*, *341*, 122527. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122527

3. Song, R., Papadimitriou, E., Negenborn, R. R., & Gelder, P. V. (2024). Integrating situation-aware knowledge maps and dynamic window approach for safe path planning by maritime autonomous surface ships. *Ocean Engineering*, *311*, 118882. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118882

4. Zhang, Z., Liu, S., Wang, H., & Wu, H. (2025). A cooperative control framework for path following of UAV-USV cooperative system in maritime scenarios. *Ocean Engineering*, *342*, 122796. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122796

5. Lu, H., Zhang, Y., Zhang, C., Niu, Y., Wang, Z., & Zhang, H. (2025). A multi-sensor fusion approach for maritime autonomous surface ships berthing navigation perception. *Ocean Engineering*, *316*, 119965. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119965

6. Liu, C., Chu, X., Wu, W., Li, S., He, Z., Zheng, M., Zhou, H., & Li, Z. (2022). Human–machine cooperation research for navigation of maritime autonomous surface ships: A review and consideration. *Ocean Engineering*, *246*, 110555. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110555

7. Kim, H., Pal, A., Cho, J., Al-Kabbany, A. M., Kaswan, K., Joshi, R.,

Na, S., Lee, J., Choi, K., Kim, M., Choi, D., & Lin, Z. (2025). Thermochromic fiber-based self-powered detection system for maritime oil spill monitoring and fire safety applications. *Nano Energy*, *147*, 111569. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2025.111569