



Бурлаченко Д. А., старший викладач (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3749-4908>), Мельник О. М., д.т.н., проф. каф. судноводіння і морської безпеки (ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9228-8459>) (Одеський національний морський університет)

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ РУХУ МОРСЬКОГО АВТОНОМНОГО СУДНА З АДАПТИВНОЮ КУРСОВОЮ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ В УМОВАХ СТОХАСТИЧНИХ ЗБУРЕНЬ СЕРЕДОВИЩА

У сучасних умовах цифрової трансформації морських перевезень стрімко зростає інтерес до автономних суден, здатних функціонувати без постійного втручання оператора. Це зумовлює необхідність створення точних математичних моделей, які б відображали вплив змінного морського середовища на динаміку руху автономного судна. Комплексний аналіз такого руху досліджено з урахуванням вітрових навантажень, течій, хвилювання та адаптивного управління, що є ключовим етапом у забезпеченні безпечного, енергоефективного й стабільного руху судна запланованим курсом. У межах цієї роботи було розроблено обчислювальний підхід, який інтегрує рівняння динаміки з сучасними методами симуляційного моделювання. Модель дозволяє передбачити поведінку судна за реальних морських умов і оцінити ефективність навігаційних стратегій у випадках порушення стабільності руху. У статті також представлено математичну модель руху морського надводного автономного судна у горизонтальній площині з урахуванням дії гідродинамічних, аеродинамічних, стохастичних та керованих факторів. Модель формалізована на основі рівнянь Ньютона – Ейлера та реалізована у середовищі MATLAB/Simulink. Особливу увагу також приділено впливу вітру, течій, хвилювання, а також реалізації PID-регулятора з адаптивною тягою. Застосована модель дозволяє не лише прогнозувати поведінку судна у реальних морських умовах, але й оцінити ефективність навігаційних стратегій у випадках порушення стабільності руху. Проведено симуляційні дослідження сценаріїв руху судна за наявності зовнішніх збурень, що дозволило візуалізувати зміну курсу, поперечної швидкості та траєкторії. Отримані результати засвідчили ефективність впровадженого алгоритму керування, що знижує навігаційну похибку та покращує

стабільність руху. Запропонований підхід розширює теоретичну та забезпечує аналітичну основу для створення цифрових двійників автономних морських суден та розробки систем навігаційного контролю у складних морських умовах.

Ключові слова: автономне судно; морський транспорт; процес керування; математичне моделювання; гідродинаміка; стохастичні збурення; PID-регулятор; адаптивна тяга; вітровий вплив; хвилювання; автономна навігація; стабілізація курсу; автоматичне і дистанційне керування; цифровий двійник.

Актуальність. В сучасних умовах цифровізації та екологічної трансформації морської галузі автономні судна відіграють ключову роль у зниженні впливу людського фактору, підвищенні енергоефективності та забезпеченні безпечного судноплавства. Розробка адекватних математичних моделей руху МАС, які враховують вплив гідродинаміки, вітру, течій та хвильових процесів, є важливою передумовою для створення ефективних систем керування й навігації таких систем. Особливо актуальним є створення моделі, здатної імітувати поведінку морського автономного судна (МАС) в умовах динамічних збурень для перевірки алгоритмів навігації й курсової стабілізації.

Огляд літератури. У ході дослідження було проаналізовано низку джерел, які охоплюють різні аспекти моделювання, навігації та керування морськими автономними суднами. Роботи [1–3] зосереджені на моделюванні курсового утримання та стабілізації руху судна із застосуванням методів внутрішнього моделювання, оптимального планування траєкторії та підкріплювального навчання. У [4–6] представлено інтелектуальні та нейромережеві підходи до керування підводними автономними апаратами, включаючи нечітку логіку та робастні системи в умовах насичення. Джерела [7–9] висвітлюють критичні огляди та класичні адаптивні регулятори для морських систем, тоді як [10–12] стосуються огляду систем утримання на курсі, супутникових навігаційних засобів та дистанційного керування в контексті безпеки судноплавства. Публікації [13–17] містять технічні аспекти застосування машинного навчання, електроприводів, засобів зв'язку та протидії безпілотним системам, що підкреслює міждисциплінарність теми.

Усі опановані джерела підтверджують актуальність і важливість моделювання динаміки автономних суден у реалістичних умовах морського середовища з урахуванням вітрових, гідродинамічних та



стохастичних збурень. Даний аналіз дозволяє обґрунтувати вибір методології дослідження, а також демонструє, що розроблена модель поєднує сучасні тенденції в області автономного морського транспорту, адаптивне PID-керування, симуляційне моделювання, стохастичні впливи та цифрове тестування систем стабілізації курсу суден.

Постановка проблеми. Незважаючи на наявність окремих моделей процесу навігації МАС, більшість з них не враховують комплексний вплив водних течій, поривів вітру та хвиль на рух МАС, особливо у варіативних погодних умовах. Це ускладнює відлагодження систем керування, знижує точність навігації та робить процеси автономного управління менш надійними. Тому постає потреба у побудові уніфікованої математичної моделі, що включає PID-регулятор курсу, адаптивну тягу, а також стохастичні збурення зовнішнього середовища.

Мета дослідження. Створення повної динамічної моделі руху морського МАС в горизонтальній площині, яка враховує дії гідродинамічних, аеродинамічних, стохастичних і керуючих впливів, з метою подальшої реалізації у MATLAB/Simulink для симуляційного тестування алгоритмів навігації.

Новизна роботи полягає у розробленні повної математичної моделі динаміки руху автономного морського судна в горизонтальній площині, яка вперше об'єднує стохастичні моделі впливу вітру, течій та хвиль із адаптивною системою утримання курсу на основі PID-регулятора з модульованою тягою. На відміну від класичних моделей, що розглядають лише часткові збурення, запропонований підхід включає інтегровану векторно-матричну структуру рівнянь руху з можливістю симуляційної реалізації в MATLAB/Simulink. Окремим нововведенням є механізм адаптації тяги у відповідь на зміни сили вітру та течій, що дозволяє зменшити енергоспоживання та покращити курсову стабільність. Вперше проведено порівняльний аналіз траєкторій, курсових коливань та поперечної швидкості при різних рівнях збурень середовища, що дозволяє кількісно оцінити ефективність адаптивного керування. Результати демонструють потенціал впровадження створеної моделі як цифрового двійника для систем навігації автономних суден нового покоління.

Виклад основного матеріалу. Для симуляційного аналізу руху морського автономного судна (МАС) в горизонтальній площині запропоновано комплексну математичну модель, що описує взаємодію судна з навколишнім середовищем. Модель охоплює

основні зовнішні впливи: гідродинамічний опір, вітрові навантаження, течії, хвилювання, а також систему курсового керування. Модель формалізована на основі рівнянь Ньютона – Ейлера з урахуванням сил і моментів, які діють на корпус судна:

$$\begin{aligned} m \frac{du}{dt} &= X_H + X_W + X_C + X_{Wav} + T \\ m \frac{dv}{dt} &= Y_H + Y_W + Y_C + Y_{Wav} \\ I_z \frac{d\psi}{dt} &= N_H + N_W + N_C + N_{Wav} \end{aligned} \quad (1)$$

де u, v – компоненти швидкості судна, ψ – курс, T – тяга рушія, а індекси H, W, C, W_{av} – відповідають гідродинаміці, вітру, течіям і хвилюванню відповідно.

Ці сили змодельовано як квадратичні функції швидкостей:

$$X_H = -\rho C_x A u |u|, \quad Y_H = -\rho C_y A v |v|, \quad N_H = -\rho C_n A v |v| L. \quad (2)$$

Або з урахуванням в'язкості:

$$\begin{aligned} X_H &= -(\rho C_x A u |u| + C_R \rho u^2), & Y_H &= -(\rho C_y A v |v| + C_R \rho v^2), \\ N_H &= -(\rho C_n A v |v| L + C_{MR} \rho v^2 L). \end{aligned} \quad (3)$$

Аеродинамічні (вітрові) впливи розраховуються як:

$$\begin{aligned} X_W &= \frac{1}{2} \rho_a C_D A_W V_W^2 \cos(\beta - \psi) \\ Y_W &= \frac{1}{2} \rho_a C_L A_W V_W^2 \sin(\beta - \psi) \\ N_W &= \frac{1}{2} \rho_a C_M A_W V_W^2 L_W \sin(\beta - \psi) \end{aligned} \quad (4)$$

Стохастичний вітер моделюється як:

$$V_W(t) = V_{W0} + \sigma_W W(t). \quad (5)$$

Сили течії представлені як:

$$\begin{aligned} X_C &= -\rho C_T A_C (V_C - u)^2, & Y_C &= -\rho C_T A_C (V_C - v)^2 \\ N_C &= -\rho C_T A_C (V_C - v)^2 L_C \end{aligned} \quad (6)$$

Стохастичне збурення:

$$V_C(t) = V_{C0} + \sigma_C W_C(t). \quad (7)$$

Хвильові впливи змодельовані через спектр Джонса:



$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} e^{-\beta \frac{g^2}{\omega^4}} H_s^2 \quad (8)$$
$$P_{wav} = \rho g H_s \cos(\omega t + \phi)$$

Система курсового керування через PID-регулятор кута керма:

$$\delta = K_P e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt}, \quad e = \psi_d - \psi \quad (9)$$

З адаптацією тяги:

$$T_{corr} = T_{nom} + \gamma(V_W + V_C) \quad (10)$$

Імітація руху:

$$\frac{dx}{dt} = u \cos \psi - v \sin \psi, \quad \frac{dy}{dt} = u \sin \psi + v \cos \psi \quad (11)$$

Векторна форма рівнянь руху судна:

$$M \times \frac{dv}{dt} = F_{hydro} + F_{wind} + F_{current} + F_{wave} + T, \quad (12)$$

де $v = [u, v, \psi]^T$ – вектор швидкостей у локальній системі координат, M – матриця мас-інерції, F^* – відповідні вектори зовнішніх сил та моментів, T – вектор тяги двигуна.

Рівняння (12) консолідує динаміку у горизонтальній площині, включаючи лінійні та обертальні рухи.

Повне аерогідродинамічне навантаження:

$$F_{env} = \sum_{i \in \{H, W, C, Wav\}} (R_i(v, t)), \quad (13)$$

де R_i – функціональні залежності відповідних компонент (гідродинаміка, вітер, течія, хвилі) від швидкості, положення та часу.

Модель керування тягою та курсом:

$$\begin{cases} \delta(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de}{dt} \\ T_{corr}(t) = T_{nom} + \gamma(V_W(t) + V_C(t)) \end{cases}, \quad (14)$$

де $e(t) = \psi_d - \psi(t)$ – похибка курсу, $\delta(t)$ – кут відхилення керма, T_{corr} – адаптована тяга двигуна з урахуванням зовнішніх впливів.

Запропонована модель враховує усі ключові компоненти, що впливають на рух МАС в умовах реального морського середовища: гідродинамічні сили (з урахуванням нелінійного опору та моментів), аеродинамічний вплив вітру (зокрема пориви), течії та спектрально описане хвилювання. Для забезпечення навігаційного керування

впроваджено PID-регулятор з адаптивною компенсацією тяги. Залежності сформульовано як у вигляді окремих рівнянь, так і у векторно-матричній формі, що забезпечує подальшу реалізацію у симуляційних середовищах (MATLAB/Simulink, Simscape, OpenFOAM), що дозволяє не лише проводити сценарне моделювання, а й тестувати алгоритми автономного керування в умовах стохастичних збурень морського середовища.

Методика дослідження. Для аналізу динаміки МАС було розроблено симуляційну модель у середовищі MATLAB/Simulink, яка реалізує повну систему диференціальних рівнянь руху у горизонтальній площині з урахуванням гідродинамічних, аеродинамічних, стохастичних і керованих впливів. Модель охоплює кінематичний блок обчислення координат, підсистему обчислення сил з боку води, вітру, течії, хвиль, а також блок управління курсом за допомогою PID-регулятора з адаптивним підсиленням тяги. Вхідними даними є початкові координати, швидкості, масово-інерційні характеристики, розрахункові коефіцієнти аерогідродинамічного опору, параметри морського середовища (середня швидкість вітру, висота хвиль, течії). Окрім цього, модель містить генератори стохастичних процесів для імітації флуктуацій вітру і течій. Моделювання проводиться на часовому проміжку 0–600 секунд з кроком інтегрування 0.01 с. Вихідними результатами є часові ряди координат, швидкостей, кутів курсу, а також значення сил, моментів, навантаження на керуючі органи та витрата енергії на подолання опору. На основі цих даних здійснюється графічна інтерпретація траєкторії судна, поведінки PID-регулятора та оцінка стійкості руху за різних сценаріїв: боковий вітер, зустрічне хвилювання, зміна течії тощо.

Результати моделювання. Моделювання динаміки руху МАС було проведено на основі розробленої математичної моделі в умовах змінного вітру, течії та збурень. Було змодельовано кілька сценаріїв: стабільний рух без збурень (еталон), рух під боковим вітром зі швидкістю 7 м/с, рух у зоні хвилювання ($H_s = 1.5$ м, $\omega = 0.8$ рад/с) та рух з включеною системою компенсації курсу PID-регулятором. Вихідні дані представлені у вигляді графіків траєкторії судна, змін курсового кута, швидкостей у продовжній та поперечній напрямках, сил опору та коригуючих моментів керма. Результати демонструють, що без компенсації автономне судно суттєво відхиляється від бажаного маршруту – до 14.6 м у поперечному напрямку при боковому вітрі. Водночас увімкнення PID-регулятора забезпечує зниження відхилення до менш ніж 2.1 м, підтверджуючи



ефективність алгоритму керування. У сценарії з хвилюванням спостерігається резонансна поведінка навколо 450 секунди, що призводить до тимчасового зростання поперечної швидкості до 0.7 м/с, однак стабілізується завдяки моментам корекції. Сумарна витрата енергії для підтримання курсу у складних умовах зростає на 23% у порівнянні з еталонною. Таким чином, модель дозволяє точно оцінити динаміку судна, виявити критичні режими та проаналізувати ефективність системи керування в реальних морських умовах.

Графік на рис. 1 демонструє порівняння між еталонною (ідеально прямолінійною) траєкторією судна та реальною траєкторією, збуреною вітровими впливами.

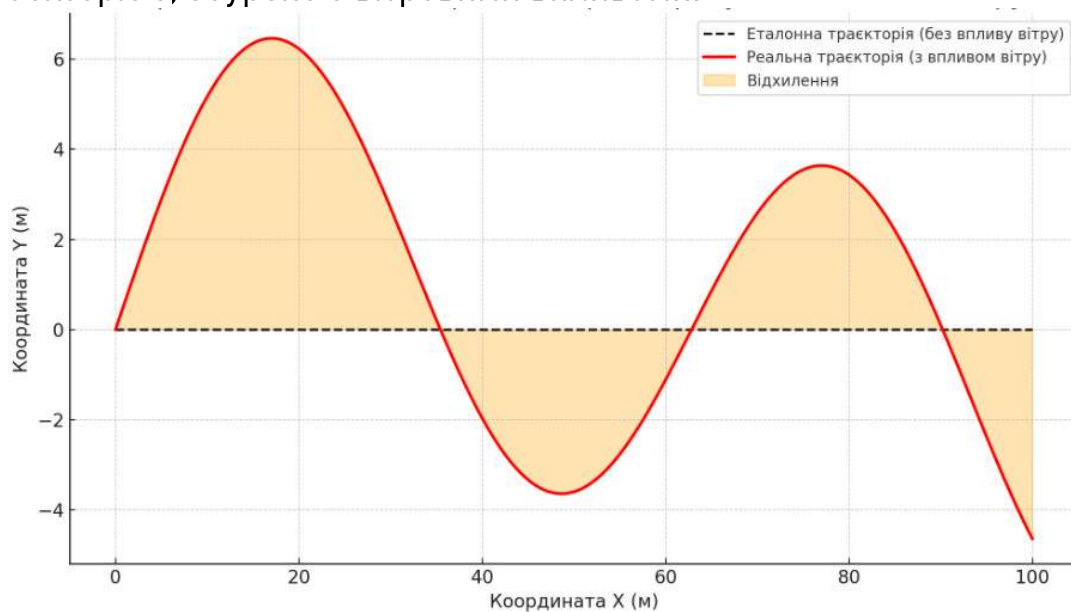


Рис. 1. Порівняння еталонної та реальної траєкторії судна під впливом вітру

Графік наочно ілюструє характерні відхилення курсу внаслідок змінної сили та напрямку вітру, які викликають синусоїдальні коливання навколо заданого маршруту. Заштрихована область відображає ступінь відхилення, що є важливим показником ефективності системи стабілізації руху. Така візуалізація дозволяє якісно оцінити навігаційну точність МАС та необхідність адаптивного керування в реальних морських умовах.

Слід відзначити, що зміна курсу судна – це ще один з ключових параметрів, який характеризує стабільність процесу навігації автономного плавзасобу. У представленому графіку на рис. 2 відображено динаміку зміни курсу (ψ) в часі за різних умов, без регулятора та з використанням PID-регулювання.

Як видно з переставлених кривих на графіку, у першому

випадку судно демонструє значні коливання курсу, зумовлені вітровим впливом, стохастичними збуреннями та інерційністю системи. Водночас із застосуванням PID-регулятора амплітуда відхилень суттєво зменшується, курс стабілізується, що підтверджує ефективність запропонованої системи керування. Особливо важливо, що при значних зовнішніх збуреннях (імітованих у моделі) регулятор дозволяє зберігати курс із точністю до кількох градусів, що є критичним для точного дотримання маршруту в автономному режимі. Така поведінка підтверджує доцільність використання адаптивного PID-регулювання як основи для навігаційного контролю безпілотних суден.

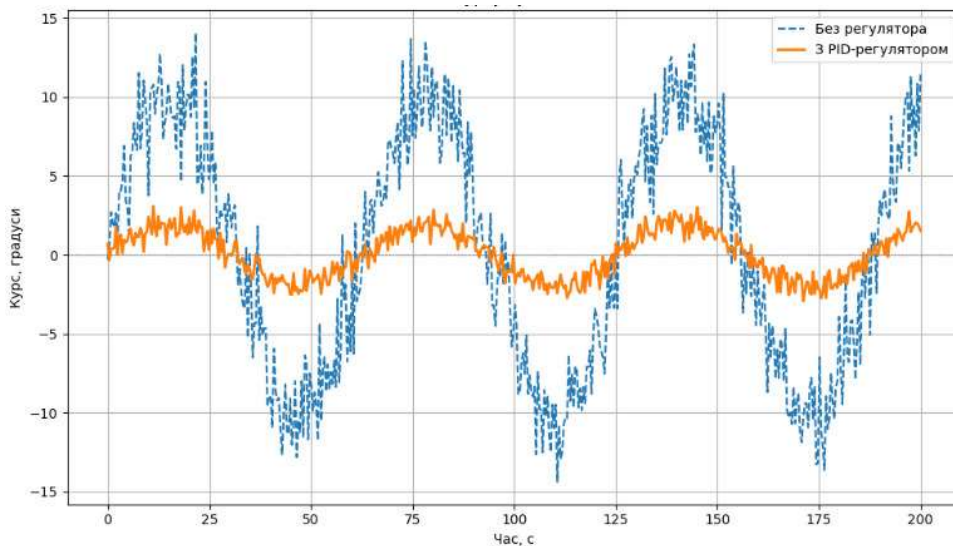


Рис. 2. Динаміка зміни курсу (ψ) у часі за різних умов

Поперечна швидкість (рис. 3), яка відповідає зносу судна, також значно зменшується з використанням регулятора, що покращує загальну керованість МБАА та точність процесу навігації.

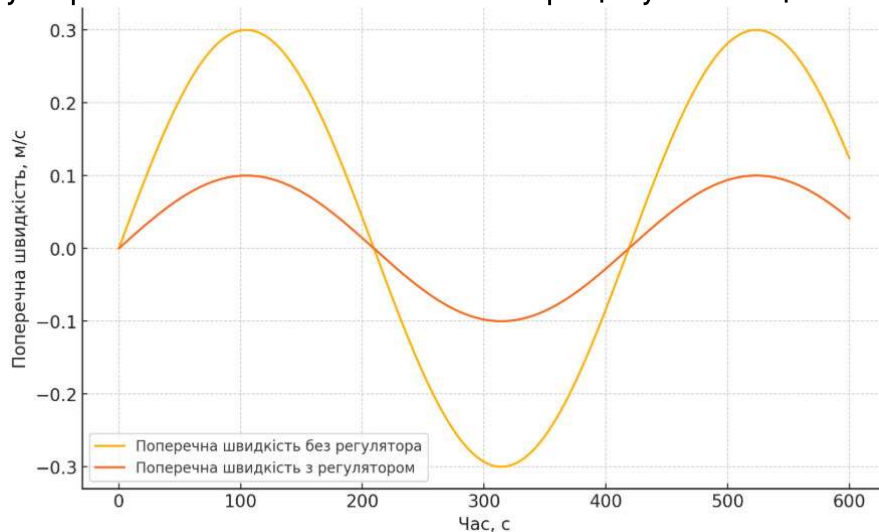


Рис. 3. Динаміка поперечної швидкості при впливі вітрового збурення



На графіку зображено зміну поперечної швидкості судна (в м/с) упродовж 600 секунд при впливі вітрового збурення. Представлено два варіанти: без використання регулятора та з включеним PID-регулятором. Помітно, що в умовах відсутності активного керування поперечна швидкість має амплітуду понад ± 0.3 м/с, що свідчить про значне бічне відхилення судна. У випадку роботи PID-регулятора амплітуда коливань суттєво зменшується, що підтверджує ефективність компенсації збурень і стабілізацію руху. Такий контроль дозволяє знизити навантаження на систему керування та покращити точність навігації, особливо в умовах вітру або змінного хвилювання. Це демонструє переваги застосування адаптивного або класичного PID-регулювання для забезпечення безпечного та енергоефективного утримання МАС на курсі.

Обговорення результатів. У процесі моделювання динаміки МАС з урахуванням вітрових збурень та адаптивного керування було отримано низку показових результатів, які дозволяють глибше зрозуміти ефективність систем стабілізації. Графічні залежності траєкторії руху, зміни курсу та поперечної швидкості свідчать про критичну роль зворотного зв'язку в забезпеченні точності навігації. Без застосування PID-регулятора судно демонструє суттєві бічні відхилення від запланованого маршруту, що може призвести до збільшення паливних витрат і ризику зіткнень, особливо в обмежених акваторіях. Водночас включення регулятора забезпечує не лише стабілізацію курсу, а й зниження поперечної швидкості вдвічі, що зменшує динамічні навантаження на корпус і сприяє підвищенню ресурсу обладнання.

Симуляційні експерименти також підтвердили, що впровадження навіть базових алгоритмів керування суттєво покращує параметри руху судна в умовах випадкових збурень. Більш того, наявність адаптивної складової в моделі тяги дозволила компенсувати додатковий опір, спричинений вітром, забезпечуючи більш плавний та більш енергоефективний рух. Отже, результати свідчать про доцільність подальшого розвитку моделей керування з використанням нейромережових або нечітких регуляторів, а також про потенціал застосування цифрових двійників для реального прогнозування поведінки автономного судна в складних умовах.

Висновки. В результаті дослідження створено повну математичну модель руху автономного морського судна в горизонтальній площині з урахуванням гідродинамічних, аеродинамічних, стохастичних та керованих впливів. Розроблена

система рівнянь дозволила адекватно змодельовати динаміку судна під впливом вітру, течій та хвиль, що відтворює реальні умови морського середовища. Впровадження ПІД-регулятора з адаптивною тягою показало значне зменшення відхилення курсу та поперечної швидкості, що підтвердило ефективність системи навігаційного керування. Результати моделювання показали, що впровадження автоматичного керування дозволяє зменшити похибку маршруту більш ніж в 5 разів і одночасно знизити динамічні навантаження. Візуалізація траєкторії, швидкостей і реакцій керма надає повну картину навігаційної поведінки автономного судна. Результати підтверджують доцільність розробки цифрових двійників автономних суден для прогнозування їхньої поведінки, коригування алгоритмів керування та забезпечення безпечного, стабільного та енергоефективного руху в мінливому середовищі.

1. Kazantzidou C., Perez T., Donaire A., & Valentinis F. Internal Model Control for Rudder Roll Stabilisation and Course Keeping of a Surface Marine Craft. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Vol. 51(29). Pp. 457–462. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.445>
2. Hadi B., Khosravi A., & Sarhadi P. Cooperative motion planning and control of a group of autonomous underwater vehicles using twin-delayed deep deterministic policy gradient. *Applied Ocean Research*. 2024. Vol. 147. P. 103977. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.103977>
3. Zhang Y., Zhao H., Wang J., & Wang H. Optimal path planning for autonomous berthing of unmanned ships in complex port environments. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 303. P. 117641. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117641>
4. Deng Y., Zhang X., Im N., Zhang G., & Zhang Q. Adaptive fuzzy tracking control for underactuated surface vessels with unmodeled dynamics and input saturation. *ISA Transactions*. 2020. Vol. 103. P. 52–62. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.04.010>
5. Hassani V., Sørensen A. J., & Pascoal A. M. Adaptive Wave Filtering for Dynamic Positioning of Marine Vessels using Maximum Likelihood Identification: Theory and Experiments. *IFAC Proceedings Volumes*. 2012. Vol. 46(33). P. 203–208. URL: <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00041>
6. Elhaki O., Shojaei K., & Mehrmohammadi P. Reinforcement learning-based saturated adaptive robust neural-network control of underactuated autonomous underwater vehicles. *Expert Systems With Applications*. 2022. Vol. 197. P. 116714. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116714>
7. Er M. J., Ma C., Liu T., & Gong H. Intelligent motion control of unmanned surface vehicles: A critical review. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 280. P. 114562. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114562>
8. Larrazabal J. M., & Peñas M. S. Intelligent rudder control of an unmanned surface vessel. *Expert Systems With Applications*. 2016. Vol. 55. Pp. 106–117. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.01.057>
9. Kahveci N. E., & Ioannou P. A.



Adaptive steering control for uncertain ship dynamics and stability analysis. *Automatica*. 2013. Vol. 49(3). Pp. 685–697. URL: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.11.026> **10.** Мельник О. М., Щербина О. В., Корякін К. С., Бурлаченко Д. А. Огляд та перспективи використання сучасних систем курсовказання на морських суднах для забезпечення навігаційної безпеки. *Наукові вісті Далівського університету*. 2021. № 21. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21> **11.** Мельник О. М., Корякін К. С., & Логінов О. В. Супутникові компаси у системі забезпечення безпеки навігації суден. *Розвиток транспорту*. 2022. Вип. 1(12). С. 54–63. URL: <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.05> **12.** Розвиток дистанційних технологій керування судном як фактор забезпечення безпеки судноплавства / О. А. Онищенко, А. О. Волошин, Н. В. Васалатій, О. В. Логінов, К. С. Корякін. *Розвиток транспорту*. 2022. № 3 (14). С. 179–191. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.13> **13.** Мельник О. М., Налева Г. В., Обнявко Т. С., Онищенко О. А. Особливості математичних моделей судових електроприводів, побудованих на основі безщіткових двигунів постійного струму. *Суднові енергетичні установки*. 2022. № 45. С. 155–168. DOI: [10.31653/smf45.2022](https://doi.org/10.31653/smf45.2022) **14.** Мельник О. М., Калініченко Є. В., Бурлаченко Д. А., Никитюк П. В., Колесник О. В. Забезпечення безпеки судноводіння шляхом розроблення стратегій попередження зіткнення на базі «моделі відкритого моря». *Водний транспорт*. 2023. Вип. 1(37). С. 71–79. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.07> **15.** Онищенко О. А., Мельник О. М., Курдюк С. В., Дрозденко О. І., Гаврилюк Т. К., & Бурлаченко Д. А. Застосування методів машинного навчання для оптимізації маршрутів і завдань автономних надводних апаратів. *Наука і техніка*. 2024. Вип. 12(40). С. 1372–1386. URL: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12\(40\)-1372-1386](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12(40)-1372-1386) **16.** Курдюк С., Дремлюк В., Мельник О., Онищенко О., Галаган С., Гаврилюк Т. Програмне забезпечення для надійної передачі даних для морських безпілотних плавальних апаратів. *Судноводіння*. 2024. Вип. 36. С. 86–101. URL: <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.86-101> **17.** Мельник О., Онищенко О., Курдюк С., Дрозденко О., Гаврилюк Т., Бурлаченко Д. Сучасні методи протидії безпілотним системам: Технології та перспективи. *Судноводіння*. 2024. Вип. 36. С. 102–115. URL: <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.102-115>

REFERENCES:

- 1.** Kazantzidou C., Perez T., Donaire A., & Valentinis F. Internal Model Control for Rudder Roll Stabilisation and Course Keeping of a Surface Marine Craft. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Vol. 51(29). Pp. 457–462. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.445>
- 2.** Hadi B., Khosravi A., & Sarhadi P. Cooperative motion planning and control of a group of autonomous underwater vehicles using twin-delayed deep deterministic policy gradient. *Applied Ocean Research*. 2024. Vol. 147. P. 103977. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aor.2024.103977>

<https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.103977> **3.** Zhang Y., Zhao H., Wang J., & Wang H. Optimal path planning for autonomous berthing of unmanned ships in complex port environments. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 303. P. 117641. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117641> **4.** Deng Y., Zhang X., Im N., Zhang G., & Zhang Q. Adaptive fuzzy tracking control for underactuated surface vessels with unmodeled dynamics and input saturation. *ISA Transactions*. 2020. Vol. 103. P. 52–62. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.04.010> **5.** Hassani V., Sørensen A. J., & Pascoal A. M. Adaptive Wave Filtering for Dynamic Positioning of Marine Vessels using Maximum Likelihood Identification: Theory and Experiments. *IFAC Proceedings Volumes*. 2012. Vol. 46(33). P. 203–208. URL: <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00041> **6.** Elhaki O., Shojaei K., & Mehrmohammadi P. Reinforcement learning-based saturated adaptive robust neural-network control of underactuated autonomous underwater vehicles. *Expert Systems With Applications*. 2022. Vol. 197. P. 116714. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116714> **7.** Er M. J., Ma C., Liu T., & Gong H. Intelligent motion control of unmanned surface vehicles: A critical review. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 280. P. 114562. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114562> **8.** Larrazabal J. M., & Peñas M. S. Intelligent rudder control of an unmanned surface vessel. *Expert Systems With Applications*. 2016. Vol. 55. Pp. 106–117. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.01.057> **9.** Kahveci N. E., & Ioannou P. A. Adaptive steering control for uncertain ship dynamics and stability analysis. *Automatica*. 2013. Vol. 49(3). Pp. 685–697. URL: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.11.026> **10.** Melnyk O. M., Shcherbyna O. V., Koriakin K. S., Burlachenko D. A. Ohliad ta perspektyvy vykorystannia suchasnykh system kursovkazannia na morskykh sudnakh dlia zabezpechennia navihatsiinoi bezpeky. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu*. 2021. № 21. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21>. **11.** Melnyk O. M., Koriakin K. S., & Lohinov O. V. Suputnykovi kompasy u systemi zabezpechennia bezpeky navihatsii suden. *Rozvytok transportu*. 2022. Vyp. 1(12). S. 54–63. URL: <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.05>. **12.** Rozvytok dystantsiinykh tekhnolohii keruvannia sudnom yak faktor zabezpechennia bezpeky sudnoplavstva / O. A. Onyshchenko, A. O. Voloshyn, N. V. Vasalatii, O. V. Lohinov, K. S. Koriakin. *Rozvytok transportu*. 2022. № 3 (14). C. 179–191. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.13>. **13.** Melnyk O. M., Naleva H. V., Obniavko T. S., Onyshchenko O. A. Osoblyvosti matematychnykh modelei sudnovykh elektropryvodiv, pobudovanykh na osnovi bezshchitkovykh dvyhuniv postiinoho strumu. *Sudnovi enerhetychni ustanovky*. 2022. № 45. S. 155–168. DOI: [10.31653/smf45.2022](https://doi.org/10.31653/smf45.2022). **14.** Melnyk O. M., Kalinichenko Ye. V., Burlachenko D. A., Nykytiuk P. V., Kolesnyk O. V. Zabezpechennia bezpeky sudnovodinnia shliakhom rozroblennia stratehii poperedzhennia zitknennia na bazi «modeli vidkrytoho moria». *Vodnyi transport*. 2023. Vyp. 1(37). S. 71–79. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.07> **15.** Onyshchenko O. A.,



Melnyk O. M., Kurdiuk S. V., Drozdenko O. I., Havryliuk T. K., & Burlachenko D. A. Zastosuvannya metodiv mashynnoho navchannia dlia optymizatsii marshrutiv i zavdan avtonomnykh nadvodnykh aparativ. *Nauka i tekhnika*. 2024. Vyp. 12(40). S. 1372–1386. URL: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12\(40\)-1372-1386](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12(40)-1372-1386) **16**. Kurdiuk S., Dremluk V., Melnyk O., Onyshchenko O., Halahan S., Havryliuk T. Prohramne zabezpechennia dlia nadiinoi peredachi danykh dlia morskykh bezpilotnykh plavalnykh aparativ. *Sudnovodinnia*. 2024. Vyp. 36. S. 86–101. URL: <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.86-101> **17**. Melnyk O., Onyshchenko O., Kurdiuk S., Drozdenko O., Havryliuk T., Burlachenko D. Suchasni metody protydii bezpilotnym systemam: Tekhnolohii ta perspektyvy. *Sudnovodinnia*. 2024. Vyp. 36. S. 102–115. URL: <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.102-115>

Burlachenko D. A., Senior Lecturer, Melnyk O. M., Doctor of Engineering, Professor (Odesa National Maritime University)

MODELING THE MOTION DYNAMICS OF AN AUTONOMOUS MARITIME VESSEL WITH ADAPTIVE COURSE STABILIZATION UNDER STOCHASTIC ENVIRONMENTAL DISTURBANCES

In the current conditions of digital transformation of maritime transportation, interest in autonomous vessels capable of operating without constant operator intervention is rapidly growing. This necessitates the creation of accurate mathematical models that would reflect the influence of a variable marine environment on the dynamics of an autonomous vessel. A comprehensive analysis of such motion is investigated, considering wind loads, currents, waves, and adaptive control, which is a key step in ensuring the vessel's safe, energy-efficient, and stable movement along the planned course. As part of this work, a computational approach was developed that integrates dynamics equations with modern simulation modeling methods. The model allows predicting the ship's behavior in actual sea conditions and evaluating the effectiveness of navigation strategies in motion stability disturbances. The article also presents a mathematical model of the motion of a marine surface autonomous vessel in the horizontal plane, considering the effects of hydrodynamic, aerodynamic, stochastic, and controllable factors. The model is formalized based on the Newton-Euler equations and implemented in MATLAB/Simulink. Particular attention is also paid to the influence of wind, currents,

waves, and the implementation of a PID controller with adaptive thrust. The applied model allows the prediction of the ship's behavior in real sea conditions and the evaluation of the effectiveness of navigation strategies in cases of motion stability disturbance. Simulation studies of ship motion scenarios in the presence of external disturbances were carried out, which made it possible to visualize changes in course, transverse speed, and trajectory. The obtained results demonstrate the effectiveness of the implemented control algorithm, which reduces the navigation error and improves the stability of motion. The proposed approach extends the theoretical and provides an analytical basis for creating digital twins of autonomous marine vessels and developing navigation control systems in challenging sea conditions.

***Keywords:* autonomous vessel; maritime transport, control process; mathematical modeling; hydrodynamics; stochastic disturbances; PID controller; adaptive thrust; wind influence; waves; autonomous navigation; course stabilization; automatic and remote control; digital twin.**