

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ТА ІМІТАЦІЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ДЛЯ АВТОНОМНОГО СУДНА З ОЦІНКОЮ СТАБІЛЬНОСТІ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ

Бурлаченко Д. А., старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: brlda.onmi@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3749-4908;

Мельник О. М., д.т.н., професор, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: m.onmi@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9228-8459.

У статті досліджено поведінку морського автономного судна (МАС) в умовах виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних із втратою керування, впливом поривчастого вітру та відмовою рульового приводу. Доведено, що дослідження аварійної поведінки морських автономних суден набуває практичного значення та підіймає проблеми безпечного застосування її енергоефективності навігаційного переходу в автономному режимі. Застосовано спрощену математичну модель динаміки руху судна в горизонтальній площині на основі рівнянь Ньютона-Ейлера з урахуванням простих рішень в умовах дії гідродинамічних, аеродинамічних та стохастичних впливів. Показано, що існує дефіцит моделей, здатних не лише відтворювати поведінку автономних суден при блокуванні рульового приводу, зникненні керуючих сигналів чи дії неочікуваних збурень, а і прогнозувати наслідки. Імітація проведена у MATLAB/Simulink із реалізацією основних аварійних сценаріїв. Результати симуляцій дозволили оцінити стабільність траєкторії руху судна та ефективність наявних стратегій керування судном. Отримані дані є основою для подальшого створення алгоритмів автоматичного аварійного реагування на позаштатні ситуації під час виконання автономних навігаційних місій.

Ключові слова: автономне судно; аварійна ситуація; симуляція; курсова стабілізація; втрати керування; морське середовище; процес керування; математичне моделювання; гідродинаміка; стохастичні збурення.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.195-208

Вступ. Зростання автономності сучасного морського флоту супроводжується потребою у розробці надійних моделей реагування автономних суден на нестандартні та критичні ситуації. Традиційні системи навігаційного керування орієнтовані на передбачувані умови й не завжди здатні забезпечити сталість траєкторії руху у разі втрати зв'язку з центром управління, відмови виконавчих органів або різких змін зовнішніх збурень. У цих умовах надзвичайно важливо не лише виявляти критичні режими руху, а й заздалегідь оцінювати можливу динаміку судна при порушеннях процесів керування. Тому дослідження аварійної поведінки морського автономного судна (МАС) набуває практичного значення як з погляду безпеки, так і енергоефективності автономного навігаційного переходу.

Постановка проблеми, аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні, не існує єдиного, повністю сформованого та ратифікованого міжнародного кодексу або конвенції, що регулює всі особливості не лише експлуатації морських автономних суден, а їх побудови. Це зумовлено тим, що технології (інформаційні, керуючі, енергетика, зв'язок, матеріали тощо) розвиваються надзвичайно швидко, і міжнародне морське право просто не встигає за ними. Однак, є низка основних документів, які формують основу для функціонування і побудови основних нормативних вимог до майбутніх і існуючих МАС.

Міжнародна морська організація (ІМО) є ключовим гравцем у розробці міжнародних норм для функціонування МАС. Вони активно працюють над цим питанням. Наведемо основні напрямки роботи ІМО за цією проблемою.

Regulatory Scoping Exercise (RSE). ІМО провела масштабну «регуляторну оцінку» (Regulatory Scoping Exercise) існуючих міжнародних документів (таких як SOLAS, MARPOL, STCW, COLREGs тощо) для визначення, які з них застосовні до МАС, які з них потребують поправок, а які взагалі не охоплюють нові виклики.

Розробка Кодексу MASS (MASS Code). Наразі ІМО активно працює над розробкою міжнародного, заснованого на цілях (goal-based), обов'язкового Кодексу для МАС. Очікується, що цей кодекс стане всеосяжним документом, який регулюватиме проектування, будівництво, експлуатацію, навчання персоналу, відповідальність та інші аспекти МАС. У червні 2025 року (зараз) ІМО організовує Симпозіум щодо МАС та Кодексу MASS, що свідчить про активну фазу цієї роботи.

Ступені автономності. ІМО визначила чотири ступені автономності, що є важливою передумовою для регулювання законодавства, визначення вимог до функціонування і побудови МАС. Це наступні ступені.

Ступінь 1. Судно з автоматизованими процесами та підтримкою прийняття рішень. Моряки на борту керують системами, деякі операції можуть бути автоматизовані, але екіпаж готовий взяти контроль над судном.

Ступінь 2. Дистанційно кероване судно з моряками на борту. Судно керується з іншого місця, але екіпаж на борту готовий для взяття повного контролю.

Ступінь 3. Дистанційно кероване судно без моряків на борту. Судно керується з іншого місця, екіпажу на борту немає.

Ступінь 4. Повністю автономне судно. Операційна система судна (інтелектуальна) здатна самостійно приймати рішення та визначати дії.

Відзначимо, що: а) ІМО вже видала деякі тимчасові рекомендації та керівництва, що стосуються проведення випробувань МАС. Вони наголошують на забезпеченні щонайменше такого ж рівня безпеки, захисту навколишнього середовища та кібербезпеки, як і для звичайних суден; б) позиція ІМО є фундаментальною, оскільки ця організація є глобальним регулятором морського судноплавства. Їхня робота ляже в основу майбутнього міжнародного правового поля для МАС. Відсутність повного кодексу на цей момент створює «сіру зону», що вимагає індивідуального підходу та тимчасових рішень.

Національне законодавство та «регуляторні пісочниці». Деякі країни, що є лідерами у розробці МАС (наприклад, Норвегія, Фінляндія, Японія, Південна Корея), вже почали розробляти власні національні законодавчі акти та створювати «регуляторні пісочниці». Це дозволяє тестувати та експлуатувати МАС у контрольованих умовах, збираючи дані та досвід для майбутніх міжнародних норм. Ці національні ініціативи є важливими «випробувальними/дослідними майданчиками», які допомагають виявити практичні проблеми та потенційні ризики, а також розробити ефективні рішення, які можуть бути потім інтегровані в міжнародні стандарти.

Правила класифікаційних товариств. Провідні класифікаційні товариства, такі як DNV, Lloyd's Register, ABS, Bureau Veritas, RINA, активно розробляють власні правила та рекомендації для проектування, будівництва та класифікації МАС. Вони пропонують «нотації класу» або «додаткові позначки» для суден з різними рівнями автономності. Класифікаційні товариства відіграють критично важливу роль у забезпеченні безпеки суден. Їхні правила є фактично технічними стандартами, які доповнюють міжнародні конвенції. Вони заповнюють прогалини, що виникають через відсутність повної міжнародної нормативної бази, надаючи рамки для сертифікації та технічної відповідності МАС.

Конвенція ООН із морського права (UNCLOS) та інші міжнародні конвенції. Попри відсутність конкретних положень про МАС, UNCLOS встановлює основоположні принципи морського права, які застосовуються до всіх суден, включаючи МАС. Наприклад, обов'язок «підкорятися капітану та офіцерам, які мають відповідну кваліфікацію», що є викликом для повністю автономних суден (Ступінь 4). Інші міжнародні конвенції, такі як SOLAS (безпека життя на морі), MARPOL (запобігання забрудненню), STCW (стандарти підготовки та дипломування моряків), COLREGs (правила запобігання зіткненням суден у морі), зараз проходять ретельний аналіз ІМО для адаптації їхніх положень до МАС.

Хоча наявні конвенції розроблені для традиційних суден з екіпажем, їхні базові принципи, такі як безпека судноплавства, захист навколишнього середовища, обов'язки суден у разі лиха, аварій залишаються актуальними. Однак, їх застосування до МАС вимагає

переосмислення та поправок, оскільки поняття «капітана на борту» або «екіпажу» стає розмитим.

Українське законодавство. Щодо України, то на сьогодні, спеціальний закон чи нормативний акт, який всебічно регулює морські автономні судна, відсутній. Чинне українське законодавство в морській галузі (Кодекс торговельного мореплавства, правила Регістру судноплавства України тощо) здебільшого орієнтоване на судна з екіпажем. Це є очікуваним, враховуючи, що Україна, як і більшість країн світу, чекає на консолідовані міжнародні стандарти від ІМО. До того часу, будь-які кроки щодо МАС в Україні, ймовірно, будуть базуватися на тимчасових дозволах або адаптації чинних норм, а також на принципах кращої міжнародної практики. Регістр судноплавства України, як і інші класифікаційні товариства, вже має «Правила класифікації та побудови морських суден», які регулярно оновлюються з урахуванням міжнародних змін, але конкретних розділів, присвячених повністю автономним суднам 3 та 4 ступеня, поки що немає.

Таким чином, нормативні вимоги до морських автономних суден перебувають у стадії активного формування. Це складний і багатогранний процес, що включає: а) міжнародні зусилля ІМО з розробки всеосяжного Кодексу MASS; б) національні ініціативи деяких країн, що слугують «полігонами» для тестування; в) діяльність класифікаційних товариств, які розробляють технічні стандарти; г) необхідність адаптації чинних міжнародних конвенцій. Відзначимо, що це перехідний період. Основний виклик полягає у забезпеченні безпеки (включно з кібербезпекою), визначенні відповідальності у разі інцидентів, а також у підготовці майбутніх фахівців, які зможуть працювати з цими передовими технологіями, адже навіть для повністю автономних суден потрібні будуть кваліфіковані оператори з дистанційних центрів керування. Майбутнє за автономією, але шлях до повного впровадження ще вимагає значної роботи над законодавчим та нормативним підґрунтям.

У дослідженні розглядаються різні сучасні джерела з акцентом на ключові елементи моделювання, навігації та керування автономними морськими суднами. Дослідження [1–3] зосереджені на моделях підтримки курсу та стабілізації руху судна з використанням методів внутрішнього моделювання у реальному часі, оптимальної (за визначеними критеріями) маршрутизації та навчання з підкріпленням.

Джерела [4–6] досліджують інтелектуальні та нейромережеві методи керування підводними апаратами, зокрема, з використанням нечіткої логіки та робастних стратегій в умовах невизначеності. Публікації [7–9] досліджують системи з адаптивними контролерами та надають критичні оцінки морських систем, тоді як [10–12] зосереджуються на технологіях супутникової навігації, системах утримання курсу та інструментах дистанційного керування, спрямованих на підвищення безпеки судноплавства.

Роботи [13–18] заглиблюються в технічні аспекти, пов'язані з машинним навчанням інтелектуальних систем управління електроприводами рушіїв, систем зв'язку та протидії безпілотним технологіям, підкреслюючи багатогранність та міждисциплінарний характер предмета дослідження. У [19] розглянуто основні небезпеки при використанні автономних суден. Методологія якісної оцінки ризиків для морських автономних надводних суден розглянуто у роботі [20], де проведено функціональний аналіз на основі когнітивної моделі та ідентифікація небезпек.

У роботах [21, 22] проведено ретельний аналіз ризиків, що виникають внаслідок використання автономних суден, наведена оцінка ризиків автономної навігаційної системи для морського автономного надводного корабля.

Проблеми запобігання зіткненням для морських автономних надводних суден на основі модельного прогнозного керування з використанням даних про наміри та кватерніонної області судна наведені у [23]. Загальний огляд морських автономних надводних суден, орієнтований на взаємодію з людиною, наведений у [24], де проаналізовано вплив та реакції людини, майбутні напрямки удосконалення взаємодії МАС та людини.

У роботі [25] аналізуються різні типи морських автономних надводних суден, піднято проблеми поширення відомих інцидентів з безпілотними літальними апаратами, використовуючи модель перцептивного циклу, на МАС. У [26] розглянуто відомі напади та атаки на комерційні морські автономні надводні кораблі в морі, наведено міри, які необхідно передбачити при проєктуванні й експлуатації МАС.

У статтях [27–29] розглянуто міжнародно-правові аспекти експлуатації автономного морського судна, проблеми та виклики, що постають перед процесом регулювання МАС, проблеми та розвиток у державному управлінні автономним судноплавством.

Опрацьовані джерела підтверджують актуальність і важливість моделювання динаміки автономних суден у реалістичних умовах морського середовища, необхідність урахування вітрових, гідродинамічних та стохастичних збурень.

Проведений аналіз дозволяє обґрунтувати вибір логіки дослідження, а також демонструє, що розроблені моделі повинні поєднувати сучасні тенденції в області автономного морського транспорту, адаптивне керування, симуляційне моделювання, урахувати стохастичні впливи, цифрове тестування систем стабілізації (наприклад, курсу).

Серед робіт, що торкаються питань аварійної поведінки або нестандартних ситуацій, переважають теоретичні підходи, орієнтовані на аналіз стійкості або компенсацію часткових збурень (наприклад, вітер або хвилювання), без урахування системної відмови в керуванні (частково-інваріантні до збурень системи). Натомість сучасні вимоги до автономного морського транспорту передбачають наявність резервних алгоритмів реагування на кризові ситуації, таких, як відмова керма чи втрата навігаційного сигналу. Саме ця прогалина і визначає актуальність створення імітаційної моделі, яка дозволяє не лише виявити слабкі місця в наявних алгоритмах, але й верифікувати траєкторну стійкість автономного судна в умовах аварій.

Але, попри значну кількість досліджень, присвячених стабілізації курсу автономних надводних апаратів, переважна більшість моделей не враховують можливості технічних відмов чи втрати контролю в ході автономного руху. Існує дефіцит моделей, здатних відтворювати поведінку МАС при блокуванні рульового приводу, зникненні керуючих сигналів чи дії неочікуваних збурень (наприклад, поривів вітру). Брак таких симуляцій ускладнює перевірку стійкості базових алгоритмів керування та не дозволяє адаптувати наявні навігаційні системи до потенційно критичних умов експлуатації.

Метою дослідження є розробка симуляційної моделі поведінки автономного морського судна при виникненні надзвичайних ситуацій, зокрема, при відмові рульового керування, втраті зворотного зв'язку та впливі поривчастого вітру, і на її основі оцінити стабільність траєкторії та динамічні властивості судна в умовах стохастичних збурень.

Уперше запропоновано симуляційний сценарій аварійних режимів МАС із варіативними конфігураціями відмов навігаційних елементів. Запропоновано підхід до імітації критичних станів із фіксацією параметрів руху у разі втрати керування, що дозволяє формувати базу для подальшої розробки антикризових протоколів. Розширено класичну модель PID-алгоритмів регулювання через впровадження функціоналу «заморожування» виконавчих органів, а також урахування змін навантажень і поперечної швидкості у порівнянні з номінальними режимами. Представлений підхід відкриває можливості для створення резервних контурів автономного керування за допомогою, наприклад, цифрових двійників суден.

Виклад основного матеріалу. Для опису динаміки автономного морського судна в горизонтальній площині використано відому систему рівнянь Ньютона-Ейлера. Судно розглядається як тверде тіло, на яке діють сукупні сили та моменти з боку гідродинаміки, аеродинаміки, течій, хвиль і системи керування.

Рух описується в локальній системі координат МАС, яка обертається відносно земної (інерційної):

$$\begin{aligned}
 m \frac{dv}{dt} &= Y_H + Y_W + Y_C + Y_{wav} + T, \\
 m \frac{dv}{dt} &= Y_H + Y_W + Y_C + Y_{wav}, \\
 I_z \frac{d\psi}{dt} &= N_H + N_W + N_C + N_{wav},
 \end{aligned} \tag{1}$$

де u, v – подовжна і поперечна швидкості судна; ψ – курс; m, I_z – маса і момент інерції судна; T – тяга; X_i, Y_i, N_i – компоненти сил і моментів відповідно до джерел впливу (H – гідродинаміка, W – вітер, C – течії, wav – хвилювання).

Гідродинамічні сили визначені, як функції швидкості:

$$X_H = -\rho C_x A u |u|, \quad Y_H = -\rho C_y A v |v|. \tag{2}$$

$$N_H = -\rho C_n A v |v| L. \tag{3}$$

Аеродинамічні (вітрові) впливи визначаються за наступними виразами:

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

а стохастичний вплив вітру моделюється як гаусівський процес:

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

Базове управління курсом здійснюється за допомогою PID-регулятора, який формує керуючий сигнал для рульового пристрою:

$$\delta(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad e(t) = \psi_d(t) - \psi(t), \tag{6}$$

де $\delta(t)$ – кут відхилення керма, $\psi_d(t)$ – задане значення курсу, K_P, K_I, K_D – коефіцієнти регулятора, $e(t) = \psi_d - \psi(t)$ – помилка курсу.

Розглянемо наступні аварійні сценарії МАС.

Сценарій 1 – відмова керма. При імітації відмови рульового керування кут керма фіксується на певному значенні або обнуляється:

$$\delta(t) = \delta_{fail} = \text{const}. \tag{7}$$

У моделі це реалізується блокуванням сигналу від PID-регулятора.

Сценарій 2 – втрата зв'язку. У випадку втрати зв'язку сигнал керування взагалі не надходить або має затримку, тобто:

$$\delta(t) = 0 \quad \text{або} \quad \delta(t) = \delta(t - \Delta t). \tag{8}$$

Дивлячись на (8), бачимо, що при втраті зв'язку сигнал моделюється, як обнуління або затримка керуючого впливу.

Сценарій 3 – раптовий боковий вітер (порив). Модель пориву реалізується як стохастичний доданий, із відповідною розмірністю, імпульс:

$$V_W(t) = V_{W0} + A_{burst} \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2\right), \tag{9}$$

де A_{burst} – амплітуда пориву, τ – тривалість, t_0 – час виникнення.

Узагальнення для симуляції полягає у тому, що всі сили, моменти та стан системи збираються у векторному вигляді для моделювання у MATLAB/Simulink:

$$M \cdot \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{F}_{\text{sum}}(\mathbf{v}, t), \quad \mathbf{v} = [u \ v \ \psi], \quad (10)$$

де M – масово-інерційна матриця, \mathbf{F}_{sum} – вектор сумарних сил і моментів, які включають описані аварійні сценарії.

Алгоритмічна реалізація моделі та сценарний аналіз

Для перевірки поведінки МАС при дії пориву вітру та контролі курсу з використанням PID-регулятора проведено чисельне моделювання. Використано дискретний час із фіксованим кроком інтегрування $\Delta t = 0,1$ с, що дозволяє визначати зміну стану системи з урахуванням гідродинамічних та аеродинамічних сил. У програмному коді реалізовано базову конфігурацію параметрів судна, PID-регулятор з обчисленням похибки курсу, імпульсний боковий вітер (як збурення) та обчислення сил та оновлення стану системи в часі.

Для оцінки поведінки МАС в умовах надзвичайних ситуацій проведено чисельне моделювання трьох наведених характерних сценаріїв: а) повна відмова рульового керування, б) втрата зв'язку з навігаційною системою, в) вплив раптового пориву вітру. В усіх випадках оцінювалось відхилення курсу судна від бажаної траєкторії.

Сценарій 1 – Відмова керма

Кермо судна блокується у нульовому положенні $\delta(t) = 0$, що унеможливлює поворот і стабілізацію курсу. Метою є визначення того, як сильно МАС буде відхилитися при боковому збуренні (порив вітру).

На графіку (див. рис. 1) видно, як під дією імпульсного вітру судно поступово змінює курс. Відсутність реакції системи керування призводить до стійкого дрейфу.

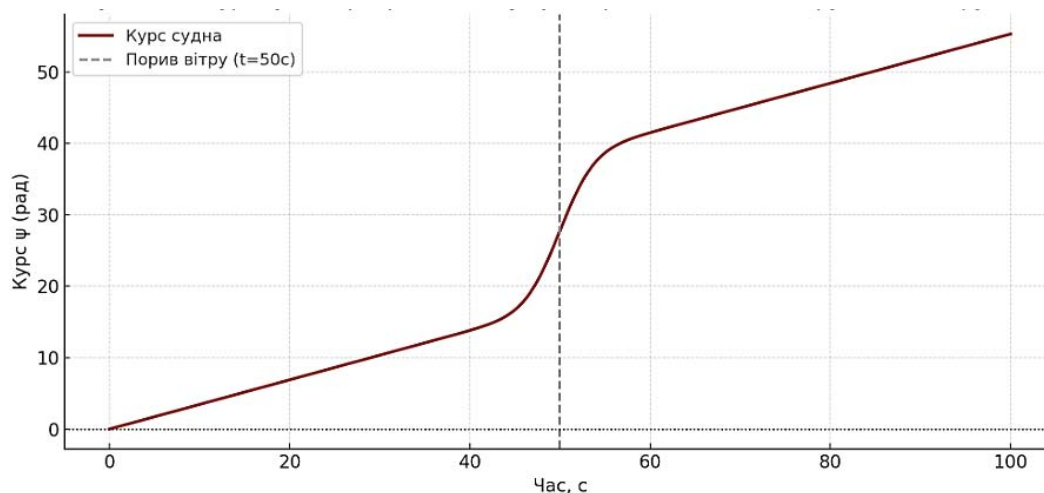


Рисунок 1 – Курс судна при фіксованому куті керма $\delta = 0$ (відмова рульового керування)

Графік демонструє поведінку МАС при повній відмові рульового керування. З моменту пориву вітру (позначено сірою пунктирною лінією на момент часу $t = 50$ с), курс починає монотонно відхилитися, оскільки система не має можливості компенсувати зовнішнє збурення. Це є найбільш критичним випадком, коли навіть при невеликому збуренні виникає неконтрольований дрейф.

Таким чином при блокуванні або заклинюванні рульового механізму МАС, що безумовно, не здатне змінити напрямок руху. У моделі це реалізовано шляхом фіксації кута керма $\delta(t) = 0$. Результати симуляції показують стійке й неконтрольоване відхилення курсу внаслідок вітрових поривів. Такий сценарій є найгірший, оскільки судно втрачає здатність до навігаційної компенсації, але напрямок можна спрогнозувати.

Сценарій 2 – Затримка сигналу

Сигнал керування надходить із запізненням $\delta(t) = \delta(t - \Delta t)$, що моделює втрату стійкого з'єднання з навігаційною системою. Метою є оцінка того, як затримка сигналу впливає на здатність утримання курсу при збуреннях. На графіку (рис. 2) показано осциляції навколо заданого курсу. Через запізнення регулятор не встигає реагувати в реальному часі, виникає аперіодичний ефект (при інших умовах – навіть пере регулювання).

У розглянутому випадку керуючий сигнал від PID-регулятора надходить із затримкою $\Delta t = 2$ с, що імітує втрату зв'язку з навігаційною системою або часове відставання сигналів датчиків.

Інколи (не наведено у статті) це може призводити до появи осциляцій курсу, які можуть спричинити навіть постійні коливання при змінному вітрі, проте судно все ще зможе зберігати здатність частково повертатись до бажаної траєкторії.

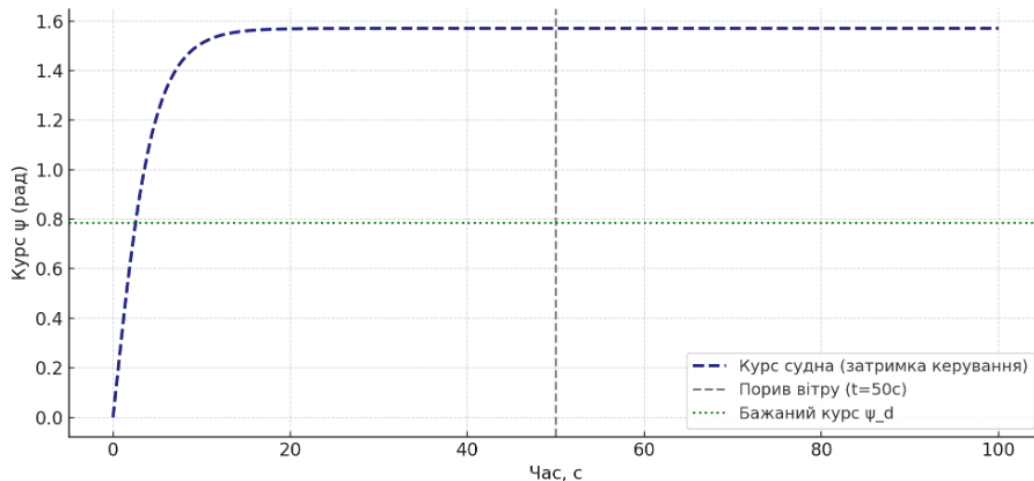


Рисунок 2 – Зміна курсу (приклад) при затримці керуючого сигналу ($\Delta t = 2$ с)

В інших умовах, через затримку керуючого сигналу на більший час, судно не здатне одразу зреагувати на відхилення, що може призводити до появи статичного відхилення від бажаного напрямку руху. Така поведінка характерна для систем із запізненням, де існує ризик нестабільності при частих збуреннях і несподіваних затримках. Саме тому є необхідність у використанні особливих алгоритмів керування, зокрема – інтелектуальних.

Сценарій 3 – Раптовий порив вітру з активним керуванням

Вважаємо, що у момент часу $t_0 = 50$ с, на судно діє сильний боковий порив вітру, змодельований як додаткова імпульсна функція. Необхідно оцінити здатність PID-регулятора повертати судно на бажаний курс. Результат моделювання показав, що попри різкому збуренні, регулятор, що налаштований на «модульний оптимум», компенсує відхилення і курс стабілізується через декілька секунд. Спостерігається незначне перерегулювання, однак воно швидко згасає, підтверджуючи часткову інваріантність до збурень алгоритмів керування. Порівняння сценаріїв дозволяє зробити висновок, що найкритичнішим є повна відмова рульового механізму (з прогнозуванням руху), тоді як за наявності навіть базової системи керування (PID) судно демонструє стійку поведінку. Затримка сигналу вказує на необхідність впровадження фаззі-нейро, нейромережного тощо керування.

Для побудови моделі руху використано відому систему рівнянь Ньютона-Ейлера, яка раніше була апробована для автономних суден у спокійних та збурених умовах [18]. У цьому дослідженні вона не змінюється, однак у рамках експериментів модифікується характер збурень та обмежується/вимикається керуючий сигнал. Це дозволяє вивчити динаміку траєкторії МАС в умовах критичних навігаційних сценаріїв.

Методика дослідження та обговорення результатів. Метою моделювання є оцінка сталості траєкторії автономного судна при впливі характерних аварійних ситуацій (збурень). Для цього реалізовано серію чисельних симуляцій у середовищі MATLAB з використанням

дискретного підходу до розв'язання рівнянь руху. Час інтегрування обрано як $\Delta t = 0,1$ с, загальна тривалість модельного часу експерименту – 100 секунд.

Параметри судна (маса, момент інерції, гідродинамічні та аеродинамічні коефіцієнти) встановлювалися згідно типовим для малої автономної платформи. Аеродинамічне збурення моделювалося у вигляді стохастичного пориву вітру, який має імпульсну форму з піковим значенням у момент визначений момент часу.

У всіх протестованих сценаріях (повна відмова керма, сигнал керування фіксується на $\delta = 0$; затримка сигналу, сигнал PID-регулятора надходить із запізненням $\Delta t = 2$ с; номінальна робота PID-регулятора, активне компенсування збурення вітру) критерієм оцінки є динаміка зміни курсу $\psi(t)$, порівняння відхилення від бажаного курсу ψ_d , аналіз характеру процесу (аперіодичний, коливальний, резонанс) та здатність системи стабілізувати напрямок руху після збурення. Основні результати чисельного моделювання дозволяють здійснити порівняльний аналіз поведінки автономного судна за різних аварійних сценаріїв.

У першому, при фіксації куту керма $\delta = 0$, судно не здатне протидіяти вітровому збуренню, що призводить до постійного наростання відхилення курсу, апарат втрачає керованість. У другому сценарії, коли керуючий сигнал надходить із затримкою, курс МАС демонструє аперіодичний процес (при збільшенні часу затримки може переходити до коливання (у статті не наведено) навколо бажаного значення ψ_d , амплітуда цих осциляцій зростає після пориву вітру, однак система все ж зберігає часткову здатність до компенсації. Аналіз свідчить про потенційну нестійкість при частих збуреннях і необхідність покращення зворотного зв'язку, наприклад, за допомогою предиктивного фільтру). У третьому сценарії PID-регулятор забезпечує швидку реакцію на зміну зовнішніх умов. Після вітрового пориву курс судна відхиляється лише на короткий час і швидко стабілізується, що демонструє високу ефективність базового контролю. Такий підхід є прийнятним для забезпечення стабільної навігації в умовах обмежених збурень.

Таблиця 1 – Порівняння ефективності компенсації збурення у трьох аварійних сценаріях

№	Сценарій	Тип збурення	Реакція системи керування	Характер відхилення курсу	Оцінка ефективності
1	Відмова керма	Імпульсний вплив вітру	Відсутня (кермо зафіксоване)	Постійне відхилення (дрейф)	Незадовільно
2	Затримка сигналу	Імпульсний вплив вітру	Робота PID регулятора із запізненням Δt сигналів	Можливі осциляції навколо ψ_d	Задовільно, ефективність низька
3	Активний PID-регулятор	Імпульсний вплив вітру	Нормальний режим, робота PID регулятора без суттєвих затримок	Швидке згасання відхилення, робастність	Задовільно

Отже, результати модельних експериментів підтверджують можливість і необхідність активного керування траєкторією МАС, критичну важливість коректної роботи системи керування для забезпечення безпеки автономного руху.

Висновки.

1. Показано, що переважна більшість моделей роботи МАС не враховують можливості технічних відмов чи втрати контролю в ході автономного руху, що існує дефіцит моделей, здатних відтворювати поведінку МАС при аваріях, що брак таких симуляцій ускладнює перевірку стійкості базових алгоритмів керування та не дозволяє адаптувати чинні навігаційні системи до потенційно критичних умов експлуатації. Також показано, що нормативна база щодо проєктування та функціонування МАС зараз активно розвивається і нормується.

2. Проведене моделювання поведінки МАС у трьох ключових аварійних сценаріях дозволило отримати дані щодо стабільності траєкторії та ефективності систем керування в

критичних умовах. Результати чисельних симуляцій, виконаних у MATLAB/Simulink, підтверджують критичну важливість надійної роботи системи керування для забезпечення безпеки автономного судноплавства.

У сценарії повної відмови керма (фіксація кута керма на нулі), МАС повністю втрачає керованість, що призводить до неконтрольованого дрейфу та постійного відхилення від заданого курсу під впливом зовнішніх збурень, зокрема імпульсного вітру. Цей результат є найбільш критичним і підкреслює необхідність розробки надійних резервних систем рульового керування та/або адаптивних алгоритмів, здатних прогнозувати та компенсувати подібні відмови.

Сценарій із затримкою керуючого сигналу (моделювання втрати зв'язку) показав, що судно все ще зберігає здатність до часткової компенсації, проте курс МАС демонструє аперіодичні (інколи навіть коливальні) процеси навколо бажаного значення). Це вказує на потенційну нестабільність при частих або тривалих затримках зв'язку та необхідність впровадження ефективніших механізмів фільтрації або предиктивних алгоритмів керування для підвищення стійкості.

Сценарій з раптовим поривом вітру за умови активного PID-регулятора продемонстрував ефективність базової системи керування. Курс судна швидко стабілізується після короткочасного відхилення, що свідчить про часткову інваріантність алгоритму до збурень. Це підтверджує, що для забезпечення стабільної навігації в умовах обмежених, але передбачуваних збурень, наявні базові контролери є задовільним рішенням.

3. Порівняльний аналіз аварійних сценаріїв наголошує на тому, що найвищий ризик для безпеки МАС несе повна втрата керованості, тоді як навіть за наявності функціонування базових систем керування судно здатне демонструвати частково-стійку поведінку.

Отримані результати формують основу для подальшого створення алгоритмів автоматичного аварійного реагування на позаштатні ситуації та синтезу оптимальних систем керування МАС, зокрема з використанням адаптивних підходів, нечіткої логіки та методів штучного інтелекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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*, 51(29), 457–462. <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*, 147, 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*, 303, 117641. <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*, 103, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.04.010>.
5. Hassani V., Sorensen A. J. & Pascoal A. M. Adaptive Wave Filtering for Dynamic Positioning of Marine Vessels using Maximum Likelihood Identification: Theory and Experiments. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(33), 203–208. <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*, 197, 116714. <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*, 280, 114562. <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*, 55, 106–117. <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*, 49(3), 685–697. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.11.026>.
10. Мельник О. М. Огляд та перспективи використання сучасних систем курсовказання на морських суднах для забезпечення навігаційної безпеки / О.М. Мельник, О.В. Щербина, К.С. Корякін, Д.А. Бурлаченко // *Наукові вісті Далівського університету*. – 2021. – № 21. <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*, 1(12), 54–63. <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.05>.
12. Мельник О. М. 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. <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*, №45, С. 155–168. <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*, 1(37), 71–79. <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*, 12(40), 1372–1386. [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. (2024). Програмне забезпечення для надійної передачі даних для морських безпілотних плавальних апаратів. *Судноводіння*, 36, 86–101. <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*, 36, 102–115. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.102-115>.
18. Бурлаченко Д. А., Мельник О. М. Моделювання динаміки руху морського автономного судна з адаптивною курсовою стабілізацією в умовах стохастичних збурень середовища. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*, 1(109).
19. Volkov O., Petrychenko O. & Vlasenko Y. Danger of using autonomous ships. *Судноводіння*. 2023. Вип. 34. URL: https://navjournal-nuoma.learnmarine.com/wp-content/uploads/2023/05/34-2023_O.-Volkov-O.-Petrychenko-Y.-Vlasenko-Danger-of-us%D1%96ng-autonomous-ships.pdf.
20. Roh H. et al. Qualitative Risk Assessment Methodology for Maritime Autonomous Surface Ships: Cognitive Model-Based Functional Analysis and Hazard Identification. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 13, no. 5. P. 970. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/5/970>.
21. Mihailidis A. & Nikitakos N. Analysis of Risks Arising from the Use of Autonomous Vessels. *Journal of Maritime & Transportation Science*. 2023. Vol. 63, no. 1. P. 63–74. URL: https://www.researchgate.net/publication/377683241_Analysis_of_Risks_Arising_from_the_Use_of_Autonomous_Vessels.
22. Tsolakis T. et al. A risk assessment of an autonomous navigation system for a maritime autonomous surface ship. *International Journal of Navigation and Port Research*. 2025.

<https://doi.org/10.1080/20464177.2025.2460268>. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20464177.2025.2460268>.

23. Poplavska I. & Tkachenko O. Collision Avoidance for Maritime Autonomous Surface Ships Based on Model Predictive Control Using Intention Data and Quaternion Ship Domain. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, no. 1. P. 124. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/1/124>.

24. Wróbel M. A human-centred review on maritime autonomous surfaces ships: impacts, responses, and future directions. *Ergonomics*. 2024. <https://doi.org/10.1080/01441647.2024.2325453>. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01441647.2024.2325453>.

25. Ryan P. et al. Maritime autonomous surface ships: can we learn from unmanned aerial vehicle incidents using the perceptual cycle model? *Ergonomics*. 2022. Vol. 65, no. 12. P. 1779–1798. <https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2126896>. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00140139.2022.2126896>.

26. Rhee J. Attacks on Commercial Maritime Autonomous Surface Ships at Sea in. *The International Journal of Marine and Coastal Law*. 2023. Vol. 38, no. 2. P. 266–291. URL: https://brill.com/view/journals/apoc/8/2/article-p266_005.xml.

27. Веремчук В. С. Міжнародно-правові аспекти експлуатації автономного морського судна: постановка питання. *Правова держава*. 2023. Вип. 50. С. 280272. <https://doi.org/10.18524/2411-2054.2023.50.280272>. URL: <http://pd.onu.edu.ua/article/view/280272>.

28. Issa M. et al. Maritime Autonomous Surface Ships: Problems and Challenges Facing the Regulatory Process. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 23. P. 15630. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/23/15630>.

29. Luchenko Y. Challenges and Developments in the Public Administration of Autonomous Shipping. *Lex Portus*. 2023. Вип. 1. С. 9–12. URL: https://lexportus.net.ua/vipusk-1-2023/luchenko_912.pdf.

REFERENCES

1. Kazantzidou, C., Perez, T., Donaire, A., & Valentinis, F. (2017). Internal Model Control for Rudder Roll Stabilisation and Course Keeping of a Surface Marine Craft. *IFAC-PapersOnLine*, 51(29), 457–462. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.445>.

2. Hadi, B., Khosravi, A., & Sarhadi, P. (2024). Cooperative motion planning and control of a group of autonomous underwater vehicles using twin-delayed deep deterministic policy gradient. *Applied Ocean Research*, 147, 103977. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.103977>.

3. Zhang, Y., Zhao, H., Wang, J., & Wang, H. (2024). Optimal path planning for autonomous berthing of unmanned ships in complex port environments. *Ocean Engineering*, 303, 117641. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117641>.

4. Deng, Y., Zhang, X., Im, N., Zhang, G., & Zhang, Q. (2020). Adaptive fuzzy tracking control for underactuated surface vessels with unmodeled dynamics and input saturation. *ISA Transactions*, 103, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.04.010>.

5. Hassani, V., Sørensen, A. J., & Pascoal, A. M. (2012). Adaptive Wave Filtering for Dynamic Positioning of Marine Vessels using Maximum Likelihood Identification: Theory and Experiments. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(33), 203–208. <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00041>.

6. Elhaki, O., Shojaei, K., & Mehrmohammadi, P. (2022). Reinforcement learning-based saturated adaptive robust neural-network control of underactuated autonomous underwater vehicles. *Expert Systems With Applications*, 197, 116714. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116714>.

7. Er, M. J., Ma, C., Liu, T., & Gong, H. (2023). Intelligent motion control of unmanned surface vehicles: A critical review. *Ocean Engineering*, 280, 114562. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114562>.

8. Larrazabal, J. M., & Peñas, M. S. (2016). Intelligent rudder control of an unmanned surface vessel. *Expert* 9. Kahveci, N. E., & Ioannou, P. A. (2013). Adaptive steering control for uncertain ship dynamics and stability analysis. *Automatica*, 49(3), 685–697. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.11.026>.
10. Melnyk, O. M., Shcherbyna, O. V., Koriakin, K. S., & Burlachenko, D. A. (2021). Ohliad ta perspektyvy vykorystannia suchasnykh system kursovkazannia na morskykh sudnakh dlia zabezpechennia navihatsiinoi bezpeky [Overview and prospects of using modern course-indicating systems on sea vessels to ensure navigation safety]. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu*, (21). <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21>.
11. Melnyk, O. M., Koriakin, K. S., & Loginov, O. V. (2022). Suputnykovi kompasy u systemi zabezpechennia bezpeky navihatsii suden [Satellite compasses in the system of ensuring ship navigation safety]. *Rozvytok transportu*, 1(12), 54–63. <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.05>.
12. Melnyk, O. M., Onishchenko, O. A., Voloshyn, A. O., Vasalatii, N. V., Loginov, O. V., & Koriakin, K. S. (2022). Rozvytok dystantsiinykh tekhnolohii keruvannia sudnom yak faktor zabezpechennia bezpeky sudnoplavstva [Development of remote ship control technologies as a factor in ensuring navigation safety]. *Rozvytok transportu*, 3(14), 179–191. <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.13>.
13. Melnyk, O. M., Naleva, H. V., Obniavko, T. S., & Onishchenko, O. A. (2022). Osoblyvosti matematychnykh modelei sudnovykh elektropryvodiv, pobudovanykh na osnovi bezshchitkovykh dvyhuniv postiinoho strumu [Features of mathematical models of ship electric drives based on brushless DC motors]. *Sudnovi enerhetychni ustanovky*, (45), 155–168. <https://doi.org/10.31653/smf45.2022>.
14. Melnyk, O. M., Kalinichenko, Y. V., Burlachenko, D. A., Nykhytiuk, P. V., & Kolesnyk, O. V. (2023). Zabezpechennia bezpeky sudnovodinnia shliakhom rozroblennia stratehii poperedzhennia zitknennia na bazi «modeli vidkrytoho moria» [Ensuring navigation safety by developing collision avoidance strategies based on the "open sea model"]. *Vodnyi transport*, 1(37), 71–79. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.07>.
15. Onishchenko, O. A., Melnyk, O. M., Kurdiuk, S. V., Drozdenko, O. I., Havryliuk, T. K., & Burlachenko, D. A. (2024). Zastosuvannia metodiv mashynnoho navchannia dlia optymizatsii marshrutiv i zavdan avtonomnykh nadvodnykh aparativ [Application of machine learning methods for optimizing routes and tasks of autonomous surface vehicles]. *Nauka i tekhnika*, 12(40), 1372–1386. [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., Onishchenko, O., Halagan, S., & Havryliuk, T. (2024). Prohramne zabezpechennia dlia nadiinoi peredachi danykh dlia morskykh bezpilotnykh plavalnykh aparativ [Software for reliable data transmission for marine unmanned aerial vehicles]. *Sudnovodinnia*, (36), 86–101. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.86-101>.
17. Melnyk, O., Onishchenko, O., Kurdiuk, S., Drozdenko, O., Havryliuk, T., & Burlachenko, D. (2024). Suchasni metody protydii bezpilotnym systemam: Tekhnolohii ta perspektyvy [Modern methods of countering unmanned systems: Technologies and prospects]. *Sudnovodinnia*, (36), 102–115. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.102-115>.
18. Burlachenko, D. A., & Melnyk, O. M. (2025). Modeliuvannia dynamiky rukhu morskoho avtonomnoho sudna z adaptyvnoiu kursovoiu stabilizatsiieiu v umovakh stokhastychnykh zburhen seredovyshecha [Modeling the dynamics of a maritime autonomous vessel with adaptive course stabilization under stochastic environmental disturbances]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*, 1(109).
19. Volkov, O., Petrychenko, O., & Vlasenko, Y. (2023). Danger of using autonomous ships. *Sudnovodinnia*, (34). https://navjournal-nuoma.learnmarine.com/wp-content/uploads/2023/05/34-2023_O.-Volkov-O.-Petrychenko-Y.-Vlasenko-Danger-of-us%D1%96ng-autonomous-ships.pdf.
20. Roh, H., Jeong, D., Park, S., & Kim, M. J. (2024). Qualitative Risk Assessment Methodology for Maritime Autonomous Surface Ships: Cognitive Model-Based Functional

- Analysis and Hazard Identification. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(5), 970. <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/5/970>.
21. Mihailidis, A., & Nikitakos, N. (2023). Analysis of Risks Arising from the Use of Autonomous Vessels. *Journal of Maritime & Transportation Science*, 63(1), 63–74. https://www.researchgate.net/publication/377683241_Analysis_of_Risks_Arising_from_the_Use_of_Autonomous_Vessels.
22. Tsolakis, T., Georgakarakos, V., Theodoulidis, C., & Loukas, D. (2025). A risk assessment of an autonomous navigation system for a maritime autonomous surface ship. *International Journal of Navigation and Port Research*. <https://doi.org/10.1080/20464177.2025.2460268>.
23. Poplavska, I., & Tkachenko, O. (2025). Collision Avoidance for Maritime Autonomous Surface Ships Based on Model Predictive Control Using Intention Data and Quaternion Ship Domain. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1), 124. <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/1/124>.
24. Wróbel, M. (2024). A human-centred review on maritime autonomous surfaces ships: impacts, responses, and future directions. *Ergonomics*. <https://doi.org/10.1080/01441647.2024.2325453>.
25. Ryan, P., Horberry, T., & Fleming, B. (2022). Maritime autonomous surface ships: can we learn from unmanned aerial vehicle incidents using the perceptual cycle model? *Ergonomics*, 65(12), 1779–1798. <https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2126896>.
26. Rhee, J. (2023). Attacks on Commercial Maritime Autonomous Surface Ships at Sea in. *The International Journal of Marine and Coastal Law*, 38(2), 266–291. https://brill.com/view/journals/apoc/8/2/article-p266_005.xml.
27. Veremchuk, V. S. (2023). Mizhnarodno-pravovi aspekty ekspluatatsii avtonomnoho morskoho sudna: postanovka pytannia [International legal aspects of autonomous marine vessel operation: Problem statement]. *Pravova derzhava*, (50), 280272. <https://doi.org/10.18524/2411-2054.2023.50.280272>.
28. Issa, M., Ali, A., Hussein, M., Abdelhady, S., & Eltawil, Y. (2022). Maritime Autonomous Surface Ships: Problems and Challenges Facing the Regulatory Process. *Sustainability*, 14(23), 15630. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/23/15630>.
29. Luchenko, Y. (2023). Challenges and Developments in the Public Administration of Autonomous Shipping. *Lex Portus*, (1), 9–12. https://lexportus.net.ua/vipusk-1-2023/luchenko_912.pdf.

Burlachenko D., Melnyk O. BEHAVIOR MODELING AND EMERGENCY SIMULATION FOR A MARITIME AUTONOMOUS VESSEL WITH TRAJECTORY STABILITY ASSESSMENT

The article investigates the complex behavior of a Maritime Autonomous Surface Ship (MASS) during critical emergency situations. It specifically focuses on scenarios involving loss of control, sudden gusty winds, and steering drive failure. It is demonstrated that studying the emergency behavior of a MASS holds profound practical significance, directly addressing challenges related to the safe deployment and energy efficiency of autonomous navigational transits.

A simplified mathematical model, based on Newton-Euler equations, was employed to characterize the vessel's motion dynamics in the horizontal plane. This model accounts for hydrodynamic, aerodynamic, and stochastic effects in a simplified manner, thereby ensuring a realistic representation of the marine environment.

A critical gap identified in current MASS research is the deficit of models capable not only of reproducing the behavior of autonomous vessels during rudder blockage, loss of control signals, or unexpected disturbances, but also of predicting their cascading consequences. To address this deficiency, an innovative simulation scenario for MASS emergency modes was proposed. This scenario incorporates various navigational element failures. The simulation was conducted in MATLAB/Simulink, enabling the implementation and analysis of key emergency scenarios. This included a discrete integration step of 0.1 seconds over a 100-second simulation period, utilizing typical parameters for a small autonomous platform.

The study evaluated three distinct emergency scenarios:

– in the first scenario, the rudder was fixed at a zero position, leading to irreversible and uncontrolled course deviation due to wind gusts. This was identified as the most critical outcome, as the vessel loses its ability to perform navigational compensation, although the direction of drift remains predictable;

– the second scenario involved simulating a delay in the PID controller's command signal, mimicking an unstable connection. This revealed deviations from the desired course, indicating a partial retention of trajectory. However, it underscored that prolonged delays can induce not only aperiodic effects but also resonance, thereby necessitating adaptive control algorithms;

– in the third scenario, with the PID controller actively engaged, the system demonstrated a robust capability to quickly compensate for a strong lateral wind gust. The vessel's course stabilized within a few seconds after a minor transient overshoot, confirming a partial invariance to disturbances.

The simulation results provided invaluable insights into trajectory stability and the varying effectiveness of control strategies under adverse conditions. The presented approach to simulating critical states, achieved by fixing motion parameters during loss of control, established a fundamental database for developing proactive crisis response protocols. Furthermore, the classic PID control model was enhanced with a "freeze" function for actuators and adapted to account for changes in load and transverse speed. This enables the creation of redundant autonomous control loops, potentially through digital twin technologies. These data serve as a foundation for developing new automatic emergency response algorithms aimed at mitigating unforeseen and critical situations during future autonomous navigation missions.

Key words: autonomous vessel; emergency; simulation; directional stabilization; loss of control; marine environment; control process; mathematical modeling; hydrodynamics; stochastic disturbances.

© Бурлаченко Д. А., Мельник О. М.

Статтю прийнято до редакції 16.06.2025