

Волянський С.М.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Шумило О.М.

Одеський національний морський університет

Мельник О.М.

Одеський національний морський університет

Котенко О.В.

Одеський національний морський університет

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕГРАДАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЕХНІЧНИХ ВУЗЛАХ МОРСЬКИХ АВТОНОМНИХ ПЛАТФОРМ

У статті розроблено математичну модель деградації технічних вузлів морських автономних платформ (МАП), яка поєднує детерміновані та стохастичні процеси для адекватного відтворення змін працездатності системи в умовах впливу морського середовища. Запропоновано індекс критичності вузла, який забезпечує кількісну оцінку його впливу на інтегральну ефективність функціонування МАП та дозволяє здійснювати ранжування компонентів за рівнем важливості. На основі отриманих значень розроблено інтегральну функцію ефективності, яка описує поступове зниження працездатності платформи з урахуванням вагових коефіцієнтів важливості окремих вузлів. Проведено порівняльний аналіз трьох типів моделей деградації – лінійної, експоненційної та стохастичної (модель Вінера). Результати моделювання показали, що стохастичний підхід найточніше відображає реальні флуктуації параметрів у динамічних умовах експлуатації. Визначено критичний поріг функції ефективності, який може бути використаний як кількісний критерій переходу системи у граничний стан та основа для обчислення прогнозованого залишкового ресурсу (RUL). Отримані результати формують теоретичну і практичну основу для створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (DSS) у сфері технічної експлуатації морських автономних платформ. Додатково обґрунтовано можливість застосування моделі для розробки алгоритмів самодіагностики й стратегій технічного обслуговування з урахуванням поточного стану системи. Запропоновані підходи можуть бути інтегровані в інтелектуальні системи для прогнозного управління технічним ресурсом у реальному часі. Подальші дослідження передбачають інтеграцію моделі у польові випробування з метою оцінки її ефективності в реальних умовах експлуатації, де особливу увагу також буде приділено впливу змін середовища на надійність критичних компонентів системи.

Ключові слова: морські автономні платформи, деградаційні процеси, індекс критичності, інтегральна функція ефективності, залишковий ресурс (RUL), стохастичне моделювання, цифровий двійник, інтелектуальні системи підтримки рішень, технічна діагностика, операційна надійність, морський транспорт, безпека операцій, надійність.

Постановка проблеми. В системі експлуатації морських автономних платформ (МАП) забезпечення довготривалої надійності технічних вузлів є першочерговим завданням, оскільки відсутність постійного технічного обслуговування в морському середовищі значно підвищує ризик відмови функціональних вузлів. Деградаційними процесами є поступові, часто нелінійні зміни характеристик матеріалів, компонентів та під-

систем, які призводять до зниження ефективності роботи платформи в цілому.

В умовах тривалої автономності кожна підсистема (енергетична, навігаційна чи комунікаційна) піддається впливу таких факторів, як корозія, температурні коливання, вібраційні навантаження, втома матеріалу, тому врахування деградації у моделях надійності є необхідним для прогнозування часу безвідмовної

роботи (MTBF), формування та планування стратегії місії.

Класичні підходи до оцінки надійності (наприклад, моделі експоненційного старіння) недостатньо відображають реальні фізичні механізми деградації, особливо при наявності стохастичних чинників, що створює потребу в гібридних моделях, що поєднують аналітичні функції деградації, машинне навчання та симуляційні сценарії. Питання моделювання деградаційних процесів технічних систем активно досліджується протягом останніх двох десятиліть, особливо у сфері авіаційної, енергетичної та морської техніки. Ключовою проблемою є пошук адекватної математичної моделі, яка б відображала як фізичну природу зносу, так і стохастичний характер змін параметрів в умовах реальної експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій відображає науково обґрунтовану еволюцію підходів до моделювання деградаційних процесів у технічних вузлах морських автономних платформ, охоплюючи як теоретичні, так і прикладні аспекти динаміки надійності, ризику та керування життєвим циклом. У роботах [1-3] сформовано методологічні основи контролю та онлайн-моделювання ризику автономних морських систем (AMS), що забезпечує перехід від статичних до адаптивних моделей оцінки деградації технічних компонентів під впливом змінних факторів середовища. Праці [4-6] спрямовані на використання машинного навчання, глибокого підкріплювального навчання та сенсорних мереж для прогнозування відмов і визначення функціональної надійності в умовах невизначеності та збурень середовища. Джерела [7-9] демонструють практичне застосування штучного інтелекту у навігаційних і планувальних задачах автономних суден, де ризик і деградація систем враховуються в реальному часі через адаптивні системи винагород і оптимізації траєкторій. Робота [10] розширює ці підходи, показуючи ефективність гібридного навчання при високоточному позиціонуванні, що може бути аналогічно використано для калібрування деградаційних моделей морських вузлів. У дослідженнях [11-13] простежується міжгалузевий зв'язок, застосування робототехнічних, когнітивних та модульних технологій у технічному обслуговуванні та автономній координації, що формує основи для крос-індустріального перенесення алгоритмів діагностики й оцінки зношення. Робота [14] забезпечує екологічний і енергетичний контекст, де підвищення ефективності суден тісно пов'язане зі сповільненням деграда-

ції систем і оптимізацією режимів експлуатації. Нарешті, праці [15-18] розкривають український науковий внесок у структурний аналіз, оцінку технічного стану корпусних елементів, вплив навігаційних та експлуатаційних чинників на довговічність і стійкість конструкцій. Сукупно ці джерела формують цілісну методологію, у якій деградація розглядається як динамічний процес у контексті експлуатаційної адаптації, а її моделювання спирається на поєднання сенсорних даних, машинного навчання, стохастичних методів і багаторівневого управління технічним станом автономних морських платформ.

Постановка завдання. Проведений аналіз наукових джерел свідчить, що попри значну кількість підходів до опису деградаційних процесів, відсутня універсальна модель, яка б комплексно враховувала стохастичний характер зносу компонентів у морських умовах та взаємозалежність деградації окремих вузлів і зниження загальної ефективності платформи. Окремо цікавлять обмеження, пов'язані з автономністю та неможливістю регулярного технічного обслуговування.

Актуальні підходи здебільшого орієнтовані на моделювання зносу окремих компонентів, таких як акумулятори, насоси чи сенсори однак не враховують їхнього впливу на загальний рівень системної надійності. Це призводить до невідповідності між прогнозованим технічним станом окремих елементів та комплексною оцінкою готовності платформи до виконання завдань. Відтак, виникає науково-прикладна проблема яка полягає в створенні моделі, що дозволяє кількісно описати вплив деградаційних процесів у вузлах МАП на інтегральну ефективність функціонування системи з урахуванням критичності компонентів.

У межах даного дослідження сформульовано мету яка полягає в розробленні математичної моделі деградаційних процесів у технічних компонентах морських автономних платформ, яка здатна забезпечити оцінку динаміки зміни ефективності системи в часі та прогнозування критичних моментів втрати функціональності. Особливу увагу приділено процесу інтеграції стохастичних параметрів морського середовища, який дозволяє враховувати випадкові зовнішні впливи, характерні для реальних умов експлуатації. Запропонований підхід може бути основою для побудови систем підтримки прийняття рішень (DSS), орієнтованих на адаптивне планування місії з можливістю технічного обслуговування автономних платформ.

Для реалізації поставленої мети передбачено вирішення комплексу завдань: від класифікації

вузлів за критичністю до створення математичного апарату, який описує деградацію із врахуванням випадкових збурень. Дослідження охоплює аналіз існуючих підходів (детермінованих, стохастичних, гібридних), формалізацію динаміки зниження працездатності, побудову симуляційних сценаріїв та оцінку впливу деградації на інтегральний індекс ефективності.

Виклад основного матеріалу.

Класифікація технічних вузлів за критичністю

Оцінка критичності технічних вузлів є ключовим етапом при побудові математичної моделі деградації морської автономної платформи (МАП). Оскільки система складається з великої кількості підсистем з різним рівнем впливу на працездатність, необхідно визначити відносну важливість кожного вузла в контексті загальної ефективності. Отже критичність вузла характеризує його внесок у функціонування платформи та визначає, наскільки деградація даного вузла впливає на зниження інтегрального індексу ефективності $IEE(t)$.

Методологія визначення критичності

Для кожного технічного вузла i вводиться індекс критичності CI_i , який обчислюється за узагальненою формулою:

$$CI_i = \alpha_1 R_i + \alpha_2 S_i + \alpha_3 E_i + \alpha_4 M_i, \quad (1)$$

де: R_i – коефіцієнт надійності вузла (mean time between failures, MTBF); S_i – коефіцієнт структурної важливості у функціональній схемі системи; E_i – коефіцієнт енергетичного впливу (споживання чи генерація енергії); M_i – коефіцієнт впливу на місію (mission importance); $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – вагові коефіцієнти ($\sum \alpha_i = 1$), що задаються експертно на основі аналізу функцій системи.

Отже, $CI_i \in [0, 1]$, де: $CI_i \approx 1$ – вузол критично важливий для функціонування;

$CI_i \approx 0$ – вузол має незначний вплив на працездатність платформи.

Таким чином кількісного аналізу структурної стійкості морських автономних платформ (МАП) введено показник критичності вузла CI_i , який характеризує ступінь впливу окремого компонента на загальну функціональну працездатність системи. Таке формалізоване представлення дає змогу оцінювати уразливість системи та прогнозувати наслідки деградації компонентів у часі.

На основі функціонального аналізу було виділено шість базових категорій вузлів МАП, наведені у таблиці 1. Отримана класифікація може бути основою для побудови матриці ризику щодо вразливості системи та подальшого сценарного моделювання стійкості автономних платформ при часткових відмовах або втраті функцій.

Вузли з показником $CI_i > 0.8$ належать до критичної групи, оскільки безпосередньо визначають здатність системи до автономного функціонування. Вони потребують підвищеного рівня моніторингу та дублювання ключових сенсорів і каналів живлення. Елементи з $CI_i \in [0.6; 0.8]$ класифікуються високим ступенем ризику, адже їх деградація може спричинити непрямий збій, наприклад, зниження точності в процесі навігації або втрату стійкості каналу зв'язку. Вузли з $CI_i < 0.6$ формують резервну підсистему та підлягають періодичному контролю відповідно до регламенту технічного обслуговування.

Як видно з таблиці 1, енергетичні та силові вузли мають найвищі показники критичності $CI > 0.85$, що пояснюється тим, що відмова таких компонентів безпосередньо призводить до втрати автономності або здатності платформи до руху. Навігаційний модуль також має високий рівень важливості, оскільки забезпечує стабілізацію та орієнтацію у просторі, натомість кому-

Таблиця 1

Класифікація типових вузлів морських автономних платформ

№	Категорія вузла	Основна функція	Приклади	Основні механізми деградації	CI_i
1	Енергетичний блок	Генерація і зберігання енергії	Акумулятор, блок живлення	Корозія контактів, зниження ємності, старіння електроліту	0.90
2	Навігаційний модуль	Орієнтація за курсом та стабілізація руху	Гіроскоп, IMU, GPS	Дрейф сенсорів, втрати калібрування, термічний дрейф	0.85
3	Комунікаційний вузол	Передача та прийом даних	Анени, модеми, передавачі	Окислення, розбалансування резонансних частот	0.70
4	Силовий модуль	Рух та керування рухом	Електродвигун, редуктор, гвинт	Втома підшипників, перегрів, кавітація	0.88
5	Діагностичний блок	Моніторинг стану системи	Сенсорні мережі, контролери	Відмова сенсорів, шум сигналу, деградація електроніки	0.65
6	Структура корпусу	Захист і герметизація	Обшивка корпусу, ущільнення набору	Корозія, мікротріщини, гідродинамічна ерозія	0.60

нікаційні та діагностичні вузли мають менший вплив на безпосередню працездатність, проте їх деградація також обмежує можливість контролю за станом та зв'язку, що опосередковано впливає на загальну ефективність системи.

Для наочності залежність критичності вузлів можна подати у вигляді діаграми (рис. 1).

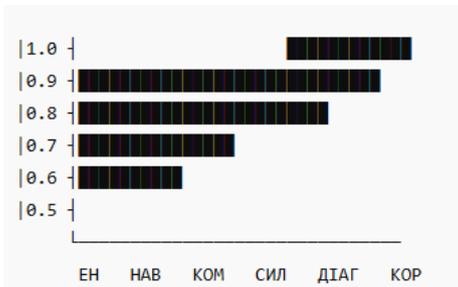


Рис. 1. Індекс критичності як функція категорії вузлів

(Умовне позначення: ЕН – енергетичний, НАВ – навігаційний, КОМ – комунікаційний, СИЛ – силовий, ДІАГ – діагностичний, КОР – корпус)

Як показано на графіку, три основні категорії – енергетичний, навігаційний та силовий модулі утворюють ядро критично важливих компонентів, що визначають тривалість і ефективність виконання місії. Запровадження індексу критичності (CI_i) дає змогу кількісно оцінити вплив кожного вузла на загальну працездатність МАП.

Зрозуміло, що найвищу чутливість до деградаційних процесів демонструють енергетичні та силові елементи, відмова яких безпосередньо впливає на втрату автономності системи. Розраховані значення CI_i можуть бути використані для побудови інтегральної моделі ефективності $IEE(t)$ та формування симуляційних сценаріїв з урахуванням процесів деградації.

Моделивання деградаційних процесів

Для адекватного опису довготривалого функціонування МАП необхідно сформулювати математичну модель, яка відображає зміну технічних характеристик вузлів у часі під впливом фізико-хімічних та механічних процесів.

Кожен вузол платформи розглядається як елементарна підсистема з певною функціональною ефективністю $P_i(t)$, яка деградує з часом через накопичення пошкоджень, зношування або старіння матеріалів. Основна ідея полягає в тому, що деградація є необоротним процесом, який зменшує корисну працездатність вузла та, відповідно, знижує інтегральну ефективність системи.

Деградація вузла i описується неперервною, зростаючою функцією часу $Di(t)$, що задовольняє умови:

$$D_i(0) = 0, \quad D_i(t) \in [0,1), \quad \lim_{t \rightarrow \infty} D_i(t) = 1. \quad (2)$$

Тобто $Di(t) = 0$ означає повну справність, а $Di(t) \rightarrow 1$ – повну відмову.

Для різних типів вузлів функція може мати різну форму. Найпоширенішими є три підходи а саме лінійна модель деградації:

$$D_i(t) = k_i \cdot t, \quad 0 \leq D_i(t) < 1, \quad (3)$$

де k_i – коефіцієнт швидкості деградації.

Такий підхід застосовується до компонентів із майже рівномірним зносом (наприклад, редуктори, корпусні елементи).

Експоненційна модель, яка здебільшого використовується для електронних модулів, акумуляторів, сенсорів:

$$D_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}, \quad (4)$$

де λ_i – параметр інтенсивності старіння.

Стохастична модель (процес Вінера / гамма-процес), яка придатна для компонентів, чутливих до випадкових навантажень або температурних коливань:

$$D_i(t) = \mu_i t + \sigma_i W(t), \quad (5)$$

де $W(t)$ – стандартний процес Вінера, μ_i – середня швидкість деградації, σ_i – дисперсія випадкових флуктуацій.

Втрата працездатності безпосередньо впливає на технічну ефективність вузла.

Нехай P_{i0} – початкова (номінальна) ефективність. Тоді у момент часу t :

$$P_i(t) = P_{i0} \cdot (1 - D_i(t)). \quad (6)$$

Таким чином, ефективність зменшується пропорційно рівню деградації.

Враховуючи стохастичний характер процесу, можна ввести очікуване значення ефективності:

$$E[P_i(t)] = P_{i0} \cdot (1 - E[D_i(t)]). \quad (7)$$

Інтегральна ефективність платформи

Загальний рівень ефективності морської автономної платформи визначається як сума зважених ефективностей роботи усіх вузлів, скоригованих на ступінь їх деградації:

$$IEE(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot P_i(t) \cdot (1 - D_i(t)), \quad (8)$$

де ω_i – ваговий коефіцієнт важливості вузла (відповідає індексу критичності CI_i); n – кількість вузлів у системі.

Підставивши $P_i(t) = P_{i0} (1 - D_i(t))$, отримаємо:

$$IEE(t) = P_{i0} \sum_{i=1}^n \omega_i (1 - D_i(t))^2. \quad (9)$$

Такий вираз є базовим для подальшого чисельного моделювання.

Критичний рівень ефективності

Визначимо порогове значення ефективності IEE_{cr} , при якому вважається, що платформа втрачає функціональну здатність виконувати місію:

$$IEE(t_{cr}) = IEE_{cr}, \quad (10)$$

де t_{cr} – момент критичного стану. Зазвичай IEE_{cr} приймають у межах 0.6-0.7 від номінального рівня $IEE(0)$. Час t_{cr} відповідає прогнозованому залишковому ресурсу (RUL) системи.

Для аналітичного сценарію розглянемо приклад для трьох вузлів з такими параметрами.

Таблиця 2

Параметри технічних вузлів

Вузол	P_{i0}	ω_i	Модель деградації	Параметри
Енергетичний блок	1.0	0.4	Експоненційна	$\lambda = 0.15$
Силовий модуль	0.8	0.35	Стохастична (Вінера)	$\mu = 0.1,$ $\sigma = 0.05$
Комунікаційний вузол	0.6	0.25	Лінійна	$k = 0.02$

Підставимо у формулу для $IEE(t)$:

$$IEE(t) = 0.4(1 - e^{-0.15t})^2 + 0.35(1 - (0.1 + 0.05W(t)))^2 + 0.25(1 - 0.02t)^2.$$

Для очікуваного значення (без шуму) отримаємо:

$$E[IEE(t)] = 0.4(1 - e^{-0.15t})^2 + 0.35(1 - 0.1t)^2 + 0.25(1 - 0.02t)^2.$$

Графік на рисунку 2 показує плавне зниження ефективності системи, причому енергетичний блок домінує у швидкості деградації.

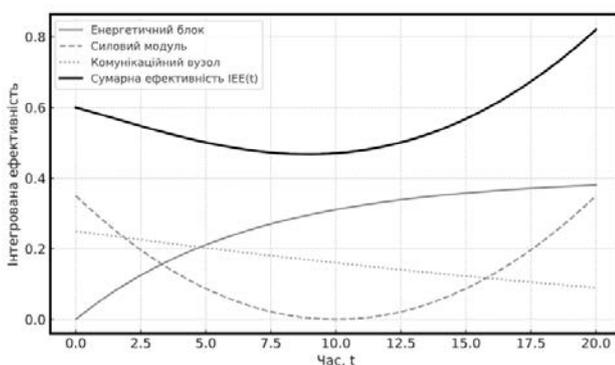


Рис. 2. Динаміка деградації інтегрованої ефективності системи $IEE(t)$ для трьох підсистем

Для подальших чисельних експериментів модель може бути представлена у вигляді диференціального рівняння деградації:

$$\frac{dD_i(t)}{dt} = f_i(D_i, t) + \xi_i(t), \quad (11)$$

де $f_i(D_i, t)$ – детермінована складова (наприклад, експоненційна), а $\xi_i(t)$ – стохастичний збурюючий термін, який описує вплив зовнішніх чинників (температури, вібрації, корозії).

Таким чином розроблена математична модель забезпечує кількісне представлення деградації вузлів у часі, яка дозволяє інтегрувати аналітичні та стохастичні компоненти, враховуючи як детермінований знос, так і випадкові флуктуації. Така модель придатна для оцінки залишкового ресурсу системи, побудови сценаріїв симуляційного моделювання та розрахунку часу досягнення критичного рівня ефективності IEE_{cr} . Отримані співвідношення є базою для побудови сценаріїв деградації та аналізу результатів моделювання.

Отримані результати підтверджують, що деградація технічних вузлів морських автономних платформ (МАП) має багатокомпонентний і стохастичний характер, який не може бути адекватно описаний класичними моделями експоненційного старіння. Введення індексу критичності дозволило здійснити кількісну оцінку внеску кожного вузла у загальну працездатність системи, що забезпечує більш точне ранжування за впливом на функціональну ефективність.

Аналіз показав, що найвищу чутливість до деградаційних процесів мають енергетичні та силові модулі, і саме ці компоненти визначають межі автономності платформи. Порівняння трьох типів моделей (лінійної, експоненційної та стохастичної) показало, що стохастичний підхід на основі процесу Вінера найкраще відображає реальні флуктуації деградації у морських умовах. Це узгоджується з сучасними дослідженнями [1-6], де подібні підходи застосовуються для прогнозування довговічності автономних підводних і надводних систем. Таким чином, запропонована модель забезпечує можливість не лише аналізу поточного стану системи, але й прогнозування залишкового ресурсу (RUL), що є ключовим для планування технічного обслуговування та управління місіями в автономному режимі.

Висновки. У статті розроблено математичну модель деградації технічних вузлів морських автономних платформ, що поєднує детерміновані та стохастичні процеси для адекватного опису динаміки їх працездатності в умовах морського середовища. Запроваджено індекс критичності вузла, який забезпечує кількісну оцінку впливу кожного компонента на інтегральну ефективність системи та дає змогу ранжувати вузли за рівнем їх важливості. Побудовано інтегральну функцію ефективності, яка описує поступове зниження працездатності системи з ура-

хуванням вагових коефіцієнтів критичності вузлів. Показано, що критичний поріг функції ефективності може бути використаний як кількісний критерій переходу системи у граничний стан, що дозволяє визначати прогнозований залишковий ресурс

(RUL). Отримані результати формують методологічну основу для створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (DSS) щодо прогнозування технічного стану морських автономних платформ у режимі реального часу.

Список літератури:

1. Wanderlingh F., Simetti E., Indiveri G. Marine Robot Control. *Encyclopedia of Systems and Control Engineering*. 2025. P. 262–273. DOI: 10.1016/B978-0-443-14081-5.00149-5
2. Yang R., Bremnes J.E., Utne I.B. Online risk modeling of autonomous marine systems: Case study of autonomous operations under sea ice. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 281. Article 114765. DOI:10.1016/j.oceaneng.2023.114765
3. Yang R., Utne I.B. Towards an online risk model for autonomous marine systems (AMS). *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 251. Article 111100. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.111100
4. Sulkowski B., Collette M. A comparison of machine learning classifiers in predicting safety for a multi-component dynamic system representation of an autonomous vessel. *Applied Ocean Research*. 2024. Vol. 154. Article 104368. DOI:10.1016/j.apor.2024.104368
5. Huang M., Li X., Li Z., Zhang D., Chen Y. Uncertainty-aware deep distributed reinforcement learning for autonomous navigation of unmanned surface vehicles in complex environments. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 342. Article 122899. DOI:10.1016/j.oceaneng.2025.122899
6. Kumar M., Rattan N., Mondal S. Sensor systems for autonomous vehicles: Functionality and reliability challenges in adverse environmental conditions. *Measurement*. 2026. Vol. 258. Article 119215. DOI:10.1016/j.measurement.2025.119215
7. Christensen K.A., Gusev A., Tufte A.G., Alsos O.A., Steinert M. AI Captain: Conversational mission planning and execution system for autonomous surface vehicles. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 338. Article 121988. DOI:10.1016/j.oceaneng.2025.121988
8. Chu S., Lin M., Li D., Lin R., Xiao S. Adaptive reward shaping based reinforcement learning for docking control of autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 318. Article 120139. DOI:10.1016/j.oceaneng.2024.120139
9. Chen X., Bose N., Brito M., Khan F., Millar G., Bulger C., Zou T. Risk-based path planning for autonomous underwater vehicles in an oil spill environment. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 266. Article 113077. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.113077
10. Khalil S., Wang Z., Aouf N. Hybrid deep learning based monocular pose estimation for autonomous space docking operations. *Acta Astronautica*. 2025. Vol. 238. P. 612–629. DOI:10.1016/j.actaastro.2025.10.010
11. Liu X., Xie S. Innovative strategy and practice of using underwater robot for marine cable inspection and operation and maintenance. *Cognitive Robotics*. 2024. Vol. 5. P. 226–239. DOI:10.1016/j.cogr.2025.06.001
12. Gomola A., Bouwer Utne I. A novel STPA approach to software safety and security in autonomous maritime systems. *Helijon*. 2024. Vol. 10. No. 10. Article e31483. DOI:10.1016/j.helijon.2024.e31483
13. Abdulai S.F., Zayed T., Wuni I.Y., Antwi-Afari M.F., Yussif A. Cross-industry review of autonomous alignment technologies: Adaptation potential for modular construction. *Journal of Cleaner Production*. 2025. Vol. 495. Article 145101. DOI:10.1016/j.jclepro.2025.145101
14. Sardar A., Islam R., Anantharaman M., Garaniya V. Advancements and obstacles in improving the energy efficiency of maritime vessels: A systematic review. *Marine Pollution Bulletin*. 2025. Vol. 214. Article 117688. DOI:10.1016/j.marpolbul.2025.117688
15. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Shibaev O., Volyanskaya Y. A comprehensive approach to structural integrity analysis and maintenance strategy for ship's hull. *Journal of Maritime Research*. 2024. Vol. 21. No. 1. P. 36–44.
16. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S. Modelling of changes in ship's operational condition during transportation of oversized and heavy cargo. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. Vol. 6. No. 2. P. 66–70. DOI:10.15587/2706-5448.2020.221653
17. Melnyk O., Kuznichenko S., Onishchenko O. Impact of AIS manipulation on shipping safety and strategic countermeasures. *Lex Portus*. 2024. Vol. 10. No. 4. P. 31–39. DOI:10.62821/lp10403
18. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Koskina Y., Lohinov O., Veretennik O., Stukalenko O. Fundamental concepts of deck cargo handling and transportation safety. *European Transport – Trasporti Europei*. 2024. No. 98. DOI:10.48295/ET.2024.98.1

Volynskyy S.M., Shumylo O.M., Melnyk O.M., Kotenko O.V. MODELING DEGRADATION PROCESSES IN TECHNICAL NODES OF MARITIME AUTONOMOUS PLATFORMS

The article develops a mathematical model of degradation of technical nodes of marine autonomous platforms (MAP), which combines deterministic and stochastic processes for adequate reproduction of changes in system performance under the influence of the marine environment. A node criticality index is proposed, which provides a quantitative assessment of its impact on the integral efficiency of MAP functioning and allows components to be ranked according to their level of importance. Based on the obtained values, an integral efficiency function has been developed, which describes the gradual decrease in platform performance, taking into account the weight coefficients of the importance of individual components. A comparative analysis of three types of degradation models has been carried out: linear, exponential, and stochastic (Wiener model). The simulation results showed that the stochastic approach most accurately reflects the real fluctuations of parameters in dynamic operating conditions. The critical threshold of the efficiency function was determined, which can be used as a quantitative criterion for the transition of the system to a limit state and as a basis for calculating the predicted remaining useful life (RUL). The results obtained form the theoretical and practical basis for the creation of intelligent decision support systems (DSS) in the field of technical operation of offshore autonomous platforms. Additionally, the possibility of using the model to develop self-diagnostic algorithms and maintenance strategies taking into account the current state of the system is substantiated. The proposed approaches can be integrated into intelligent systems for predictive real-time technical resource management. Further research involves integrating the model into field tests to assess its effectiveness in real operating conditions, where special attention will also be paid to the impact of environmental changes on the reliability of critical system components.

Key words: *marine autonomous platforms, degradation processes, criticality index, integral efficiency function, remaining useful life (RUL), stochastic modeling, digital twin, intelligent decision support systems, technical diagnostics, operational reliability, marine transport, operational safety, reliability.*

Дата надходження статті: 05.11.2025

Дата прийняття статті: 24.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025