

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

УДК 656.61:004.89:004.942

doi.org/10.33298/2226-8553.2026.1.45.01

© Маранов О.В, Носовський А.А.

МУЛЬТИАГЕНТНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ АВТОНОМНИХ МОРСЬКИХ ПЛАТФОРМ
З ПОРТОВОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ

Вибухоподібний розвиток автономних морських систем на основі агентів штучного інтелекту загострив проблему забезпечення та координації, прийняття рішень й дотримання нормативних вимог у режимі реального часу. Метою статті є розробка мультиагентної моделі взаємодії автономних морських платформ з портовою інфраструктурою, що забезпечує безпеку та екологічність операцій. Мета статті досягається широким застосуванням штучного інтелекту, який виконує низку функцій для забезпечення безпечної роботи автономних суден у складних морських середовищах. Кожна з цих функцій – навігація, виявлення перешкод, запобігання зіткненням та прийняття рішень у режимі реального часу – має вирішальне значення. Для підтримання цих функцій застосовуються різноманітні методи штучного інтелекту, у тому числі машинне навчання, глибоке навчання, навчання з підкріпленням, комп'ютерний зір та обробку природної мови. Наведено огляд елементів штучного інтелекту, використовуваних в системах морської безпеки, а також їхні переваги та недоліки з точки зору продуктивності автономної морської системи. Запропоновано високорівневу модель архітектури агентів штучного інтелекту, що функціонують у режимі реального часу в автономних судових системах. Такий підхід інтегрує сучасні технології (сенсорні функції, сприйняття, прийняття рішень, контроль та нагляд) для забезпечення безпечних, ефективних та стійких морських операцій. Основу моделі складає агент штучного інтелекту, який діє як автономна сутність, здатна обробляти вхідні дані, генерувати контекстно-залежні рішення та виконувати критично важливі для безпеки дії в умовах обмеженого часу й портової акваторії. Агенти штучного інтелекту не лише забезпечують ситуаційну обізнаність у режимі реального часу завдяки вдосконаленому об'єднанню даних датчиків, але й оптимізують маршрутизацію, споживання палива та технічне обслуговування, узгоджуючи це з галузевими цілями щодо зниження витрат та екологічної відповідальності. Детально описані функції агентів штучного інтелекту на кожному рівні архітектури. Інтеграція автономних суден з інтелектуальними портовими системами із застосуванням агентів штучного інтелекту дозволяє покращити динамічне планування, зменшити завантаженість порту та прискорити час виконання робіт у морській логістиці. Інтелектуальні порти, вдосконалені технологіями IoT, аналітикою великих даних та автоматизацією, стають основою для створення безперервного операційного континууму між судном і берегом.

Ключові слова: безпека судноводіння, безпека судноплавства, судноплавство, надзвичайні ситуації, судно, рух судна, судноводіння, управління рухом, технічні засоби судноводіння, безпека на морі, автономні морські платформи, агентний підхід, морський транспорт, портова інфраструктура, транспортні технології, штучний інтелект

Вступ. Морські перевезення є основою світової торгівлі. На морський транспорт припадає до 80% міжнародного вантажообігу в абсолютному вимірі, що є ключовим фактором сталого функціонування глобального ринку та світової економічної системи. Морська транспортна галузь знаходиться в процесі глибоких трансформаційних перетворень, пов'язаних з автоматизацією операцій та цифровізацією процесів. Окремо слід виділити широке впровадження елементів штучного інтелекту (ШІ), стрімкий

розвиток якого прийшовся на 20-ті роки ХХІ століття [1-3].

У поєднанні з науковими досягненнями у сфері сенсорних систем та систем технічного зору було створено технологічну основу розвитку автономних морських транспортних систем. Дійсно, на теперішній час важко здивувати повідомленням про успішне застосування у спеціальних місцях морських дронів. Однак автономні морські системи охоплюють широкий спектр технологій, включаючи безпілотні надводні судна (БПС), автономні підводні апарати (АНПА) та інтегровані системи моніторингу, контролю та управління рухом. Ці системи обіцяють революціонізувати морські операції, підвищуючи операційну ефективність, зменшуючи людські помилки та мінімізуючи вплив на навколишнє середовище. Так, автономні судна можуть оптимізувати споживання палива завдяки точному плануванню маршруту та адаптивній навігації, тим самим сприяючи значному скороченню викидів відпрацьованих газів [4, 5].

Інтеграція елементів ШІ в морські системи дозволяє обробляти дані та приймати рішення в режимі реального часу, що є критично важливим для безпечної та ефективної роботи морського транспорту. Системи на базі штучного інтелекту використовують значні обсяги даних, зібраних з різних датчиків, таких як радар, LIDAR, автоматичні системи ідентифікації (АІС) та камери, для отримання ситуаційної обізнаності, виявлення перешкод та прийняття обґрунтованих навігаційних рішень [3]. Ці можливості є важливими для навігації в складних та динамічних морських середовищах, взаємодії з портовою інфраструктурою. В той же час широке застосування автономних систем несе нові виклики та ризики, які потребують детального дослідження.

В першу чергу, це – забезпечення безпеки, оскільки порушення в системах ШІ можуть призвести до аварій з потенційно серйозними наслідками, включаючи шкоду навколишньому середовищу, втрату вантажу та загрози людському життю [2, 6]. Окрім питань безпеки, впровадження автономних систем має відповідати нормативно-правовим базам, що розвиваються, спрямованим на сприяння сталим та екологічно безпечним морським практикам. Такі правила, як Індикатор вуглецевої інтенсивності (СІІ) Міжнародної морської організації (ІМО) та Інтелектуальні транспортні системи Європейського Союзу (EU ITS), вимагають суворого скорочення викидів вуглецю та впровадження передових технологій для моніторингу та управління впливом на навколишнє середовище [7, 8]. Автономні морські системи, що працюють та взаємодіють на базі агентів ШІ, відіграють вирішальну роль у виконанні нормативних вимог, дозволяючи оптимізувати операції суден у режимі реального часу при взаємодії з портовою інфраструктурою, що й визначає актуальність написання статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В сучасних літературних джерелах вітчизняних та закордонних авторів визначено, що агенти штучного інтелекту сприяють безпеці, дозволяючи автономним суднам обробляти та інтерпретувати дані в режимі реального часу, сприяючи проактивному виявленню небезпек та запобіганню зіткненням, а також ефективній взаємодії з портовою інфраструктурою при виконанні навантажувально-розвантажувальних робіт. Алгоритми машинного навчання можуть аналізувати закономірності в даних датчиків для прогнозування потенційних ризиків, дозволяючи суднам безпечно плавати навіть у складних умовах. Наприклад, системи запобігання зіткненням на основі штучного інтелекту можуть розраховувати оптимальні маневри ухилення в режимі реального часу, значно знижуючи ймовірність аварій, спричинених людською помилкою або затримкою реакції [9-12].

Існуючі наукові джерела свідчать про значний інтерес та розгалуженість досліджень щодо розвитку автономних морських систем, заснованих на елементах ШІ, для безпеки на морі та технічних засобах обробки даних у режимі реального часу. Однак більшість рецензованих досліджень розглядають ці аспекти окремо, зосереджуючись на конкретних технологіях або функціональних можливостях, а не на тому, як вони взаємодіють у повністю автономних системах, включаючи портову інфраструктуру, за реальних операційних та правових обмежень.

Серйозною прогалиною є відсутність інтегративних моделей, які б враховували, як компоненти на основі ШІ працюють спільно для забезпечення безпеки, ефективності та відповідності нормативним вимогам. Хоча машинне навчання, комп'ютерний зір та об'єднання датчиків широко вивчаються в існуючій літературі, досліджень мультиагентних архітектур, які б інтегрували ці технології в інтелектуальні системи прийняття рішень у режимі реального часу та з урахуванням взаємодії з

портовою інфраструктурою, досліджені недостатньо.

Ще одним ключовим обмеженням у сучасній літературі є брак оцінок на основі сценаріїв або тематичних досліджень, які ілюструють, як ШІ-агенти реагують на зміни у реальних морських ситуаціях. Відсутність конкретних прикладів ускладнює оцінку зрілості та обмежень запропонованих систем [13-17]. У статті пропонується структурований, агентно-орієнтований підхід до побудови відповідної мультиагентної системи.

Мета статті: розробити мультиагентну модель взаємодії автономних морських платформ з портовою інфраструктурою, що забезпечує безпеку та екологічність операцій.

Виклад основної частини.

Останнім часом сфера застосування автономних морських систем значно розширилася, охоплюючи ширший спектр типів суден та операційних систем, включаючи портові операції (рис. 1).

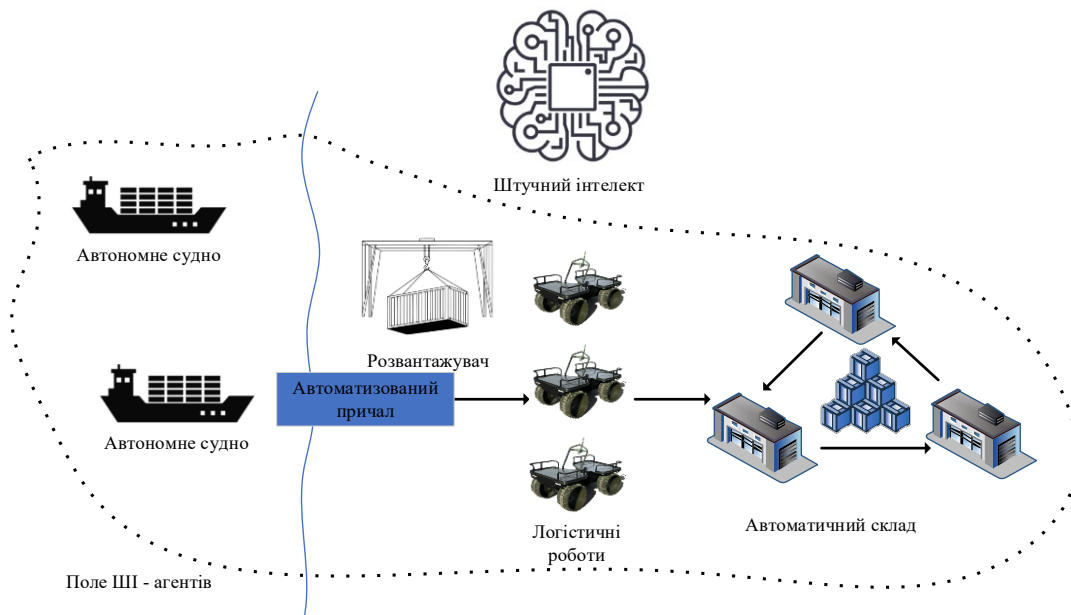


Рисунок 1. Загальна система мультиагентної системи під управлінням елементів штучного інтелекту (розроблено автором)

Сучасні автономні судна призначені для роботи з різним ступенем автономності. Існує часткова автономія, коли оператори-люди контролюють та втручаються за необхідності, а також повна автономність, коли судна здійснюють навігацію та виконують завдання без участі людини.

Цей прогрес був сприятливий завдяки розвитку сенсорних технологій, алгоритмів машинного навчання та систем зв'язку, які разом покращують здатність автономних суден сприймати навколишнє середовище, приймати обґрунтовані рішення та виконувати маневри із заданою точністю [18].

Операційні межі застосування автономних морських систем також розвивалися для підтримки їх інтеграції в існуючу морську інфраструктуру. Ці межі охоплюють розробку навігаційних протоколів, систем управління рухом та стандартів зв'язку, які дозволяють автономним суднам співіснувати з традиційними суднами. Необхідно відмітити, що інтеграція автономних суден у морський рух вимагає надійних систем запобігання зіткненням, планування маршрутів та моніторингу в режимі реального часу для забезпечення безперервної та безпечної експлуатації особливо в умовах вузькостей портів [19]. Крім того, розробка сумісних стандартів та інтерфейсів має вирішальне значення для полегшення зв'язку між автономними суднами та портовою інфраструктурою.

Таким чином, незважаючи на стрімкий розвиток автономних морських систем, забезпечення та координація сприйняття, прийняття рішень й дотримання нормативних вимог у режимі реального часу залишається складною проблемою, особливо в контексті проектування ШІ-агентів,

ШІ стає ключовою технологією у підвищенні безпеки та автономності морських операцій. Застосування ШІ в цьому контексті охоплює низку функцій, включаючи навігацію, виявлення перешкод,

запобігання зіткненням та прийняття рішень у режимі реального часу, кожна з яких має вирішальне значення для забезпечення безпечної роботи автономних суден у складних морських середовищах. Ці функції підтримуються різноманітними методами ШІ, включаючи машинне навчання, глибоке навчання, навчання з підкріпленням, комп'ютерний зір та обробку природної мови.

У табл. 1 наведено огляд елементів ШІ, використовуваних в системах морської безпеки, їхні переваги та недоліки з позиції продуктивності автономної морської системи.

Таблиця 1. Огляд елементів ШІ, що використовуються при взаємодії морських систем з портовою інфраструктурою (складено автором)

№ з/п	Елемент ШІ	Переваги	Недоліки	Варіант застосування
1.	Машинне навчання	Адаптивність, підвищена точність	Потрібні великі набори даних, перенавчання	Прогноз, оптимізація маршрутів
2.	Глибоке навчання	Висока точність розпізнавання образів	Висока обчислювальна потужність, проблеми інтерпретації	Комп'ютерний зір для виявлення перешкод
3.	Навчання з підкріпленням	Здатність вивчати складні стратегії	Час навчання, стабільність вивчених політик	Динамічне планування шляху, запобігання зіткненням
4.	Комп'ютерний зір	Обробка в режимі реального часу, детальний аналіз	Вразливий до освітлення/погодних умов	Виявлення об'єктів, моніторинг навколишнього середовища
5.	Інтеграція датчиків	Підвищена надійність даних, комплексна аналітика	Складність інтеграції даних та синхронізації	Ситуаційна обізнаність, прийняття обґрунтованих рішень в портах
6.	Обробка природної мови	Покращена взаємодія з операторами-людьми	Обмежено мовними моделями, розумінням контексту	Екстрений зв'язок, інтерфейси людина-машина

Створення та широке застосування автономних морських систем й їх взаємодія з портовою інфраструктурою регулюється міжнародними нормами, що забезпечують безпеку експлуатації, захист навколишнього середовища та юридичну відповідальність. Ці нормативні рамки (табл. 2) не просто визначають зовнішні обмеження; вони безпосередньо впливають на проектування, архітектуру та поведінку агентів штучного інтелекту у режимі реального часу.

В автономних морських системах обробка даних у режимі реального часу є не просто технологічною функцією, а критично важливим фактором інтелектуальної поведінки. Для ШІ-агентів, що працюють у динамічних морських середовищах, критично важливою є здатність сприймати, інтерпретувати потоки даних та реагувати на них за мілісекунди.

Автономні судна безперервно збирають величезні обсяги даних з мультимодальних датчиків, включаючи радар, LIDAR, AIS, сонар та візуальні камери. ШІ-агенти повинні обробляти цю інформацію в режимі реального часу, щоб підтримувати ситуаційну обізнаність, виявляти аномалії, виконувати навігаційні рішення та взаємодіяти із зовнішніми системами та операторами портової інфраструктури. Своєчасність та точність цієї обробки безпосередньо впливають на безпеку та швидкість реагування судна (рис. 2).

Таблиця 2. Вимоги керівних документів щодо застосування ІІІ-агентів при взаємодії морських автономних систем й портової інфраструктури (складено автором)

Назва нормативного акту	Керівний орган	Ключові вимоги	Вплив на взаємодію
SOLAS [20]	Міжнародна морська організація (ІМО)	Стандарти будівництва, обладнання та експлуатації суден	Забезпечує функції безпеки та надійні навігаційні системи
MARPOL [21]	ІМО	Запобігання забрудненню морського середовища	Потрібні системи контролю викидів та управління відходами
Індикатор вуглецевої інтенсивності (ІВІ) [22]	ІМО	Зменшення викидів CO ₂ з суден	Необхідна оптимізація палива та моніторинг викидів за допомогою штучного інтелекту
Інтелектуальні транспортні системи ЄС (ЕС ІТС) [23]	Європейський Союз	Інтеграція інтелектуальних технологій у транспорт	Сприяє зв'язку між автономними суднами та портами
STCW [24]	ІМО	Стандарти навчання, сертифікації та несення вахти	Забезпечує відповідність систем штучного інтелекту стандартам навчання екіпажу

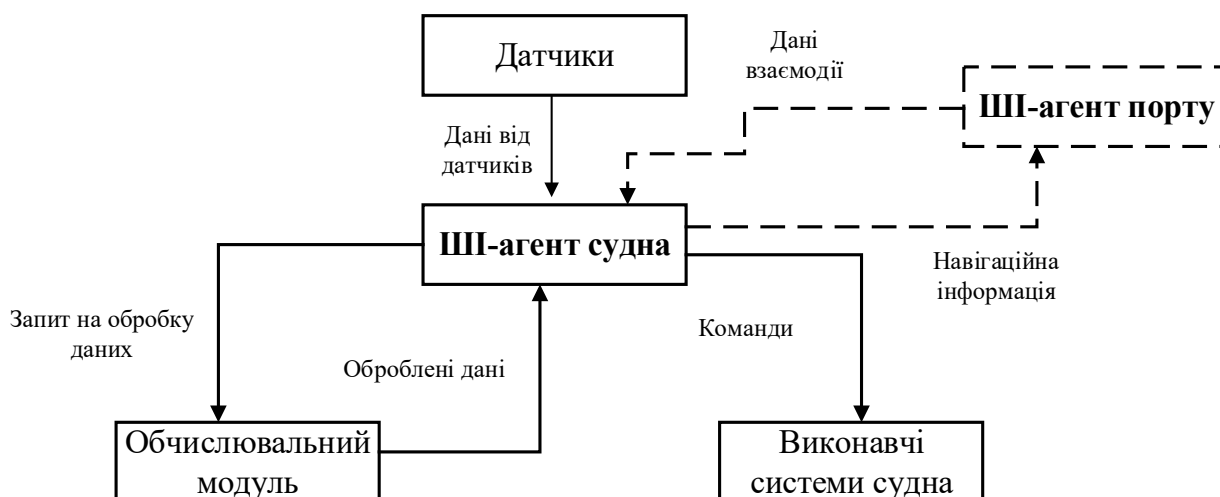


Рисунок 2. Потоки даних при взаємодії ІІІ у портовій акваторії (розроблено автором)

Архітектура ІІІ-агентів в режимі реального часу в автономних суднових системах – це складна та багатогранна структура, яка інтегрує сучасні технології для забезпечення безпечних, ефективних та стійких морських операцій. Сформуємо високорівневу модель архітектури ІІІ-агента (рис. 3).

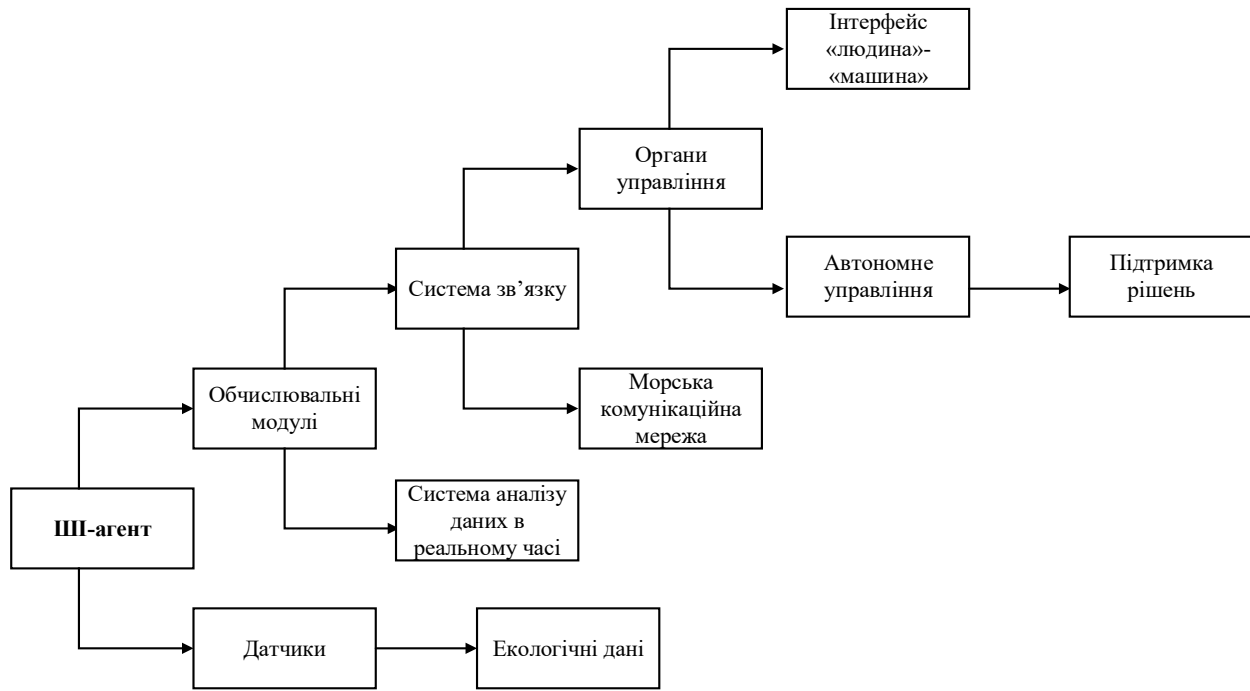


Рисунок 3. Високорівнева модель архітектури ІІІ-агента (розроблено автором)

Модель ІІІ-агентів реального часу в автономних морських системах структурована як багаторівнева структура, що інтегрує сенсорні функції, сприйняття, прийняття рішень, контроль та нагляд.

В основі цієї моделі лежить ІІІ-агент, який діє як автономна сутність, здатна обробляти вхідні дані, генерувати контекстно-залежні рішення та виконувати критично важливі для безпеки дії в умовах обмеженого часу й портової акваторії (див. рис. 3).

Апаратний та сенсорний рівень формують основу, що включає такі компоненти, як лідар, радар, гідролокатор, камери та приймачі AIS. Ці пристрої забезпечують безперервний потік даних, що описують навколишнє середовище судна та його внутрішній стан.

Над цим розташований рівень обробки та сприйняття даних, який використовує алгоритми машинного навчання, комп'ютерний зір та методи об'єднання даних датчиків для перетворення необроблених даних датчиків на практичну ситуаційну обізнаність. ІІІ-агент працює на цьому рівні, використовуючи ресурси периферійних обчислень для забезпечення швидкого та локалізованого прийняття рішень.

Рівень керування інтерпретує рішення, згенеровані ІІІ-агентом, та взаємодіє з системами навігації, руху та безпеки для виконання команд у режимі реального часу. Для гарантування безперервності критично важливих операцій передбачено резервування.

Рівень нагляду контролює загальний стан системи, підтримує співпрацю між людиною та штучним інтелектом і сприяє зовнішньому зв'язку. Він також дозволяє періодичну синхронізацію з хмарними системами для оновлення моделей, довгострокового архівування даних та колективного навчання між ІІІ-агентами.

Обчислювальні компоненти розподілені між цими рівнями для балансування ефективності обробки, енергоспоживання та стійкості системи. Периферійні обчислення забезпечують прийняття рішень з низькою затримкою, а хмарна інтеграція підтримує обмін інформацією на рівні парку пристроїв та прогнозні оновлення. Ця гібридна архітектура дозволяє ІІІ-агентам працювати автономно за нормальних умов та передавати рішення віддаленим операторам у виняткових ситуаціях.

Вбудовуючи агенти штучного інтелекту в багаторівневі системи, автономні судна отримують здатність адаптивно та безпечно реагувати на зміни в режимі реального часу, навіть у складних умовах портового трафіку та активно взаємодіяти з ІІІ-агентами портової інфраструктури.

Інтеграція ІІІ агентів в автономні морські транспортні системи є трансформаційним кроком

уперед, але він супроводжується суттєвими труднощами у впровадженні. Ці перешкоди охоплюють технічні обмеження, етичні та правові невизначеності, проблеми сумісності та інтерфейс взаємодії людини з машиною.

Інтеграція автономних суден з інтелектуальними портовими системами має одну з найбільш трансформаційних можливостей для морської логістики. Інтелектуальні порти, вдосконалені технологіями IoT, аналітикою великих даних та автоматизацією, можуть створити безперервний операційний континуум між судном і берегом. ШІ-агенти можуть координувати свої дії з портовими адміністраціями в режимі реального часу для обміну інформацією про місцезнаходження судна, орієнтовний час прибуття та розподіл причалів. Така синхронізація дозволяє динамічне планування, зменшує завантаженість порту та прискорює час виконання робіт.

Автономні судна також безпосередньо взаємодіють з автоматизованим портовим обладнанням, таким як роботизовані крани та керовані транспортні засоби, для оптимізації операцій завантаження та розвантаження. Така координація мінімізує людські помилки та підвищує безпеку й ефективність. Крім того, розумні порти можуть використовувати системи прогнозного обслуговування на основі штучного інтелекту, які контролюють стан критичної інфраструктури. Прогнозуючи збої до їх виникнення, порти можуть проактивно вирішувати потреби в технічному обслуговуванні, тим самим запобігаючи затримкам та підвищуючи надійність.

Окрім логістики, співпраця між ШІ-агентами на борту суден та системами моніторингу навколишнього середовища в портах може підтримувати управління викидами, відходами та якістю води в режимі реального часу. Ці спільні зусилля щодо забезпечення сталого розвитку узгоджуються з нормативними базами та демонструють цінність інтегрованих цифрових екосистем у досягненні як операційних, так і екологічних цілей.

Висновок. Інтеграція ШІ-агентів в автономні морські системи є трансформаційним зсувом у практиці морської логістики. ШІ-агенти в реальному часі підвищують безпеку, ефективність та сталий розвиток, підтримуючи навігацію, прийняття рішень та операційний контроль в портовій акваторії. Центральну роль вони відіграють у застосуванні запобігання зіткненням, виявленні аномалій, реагування на надзвичайні ситуації та механізмів безпеки, що значно знижує ризики та підвищує надійність.

ШІ-агенти не лише забезпечують ситуаційну обізнаність у режимі реального часу завдяки вдосконаленому об'єднанню даних датчиків, але й оптимізують маршрутизацію, споживання палива та технічне обслуговування, узгоджуючи це з галузевими цілями щодо зниження витрат та екологічної відповідальності. Важливо, що ці агенти сприяють дотриманню таких правил, як рекомендації ІМО щодо парникових газів та показник інтенсивності вуглецю (СІ), динамічно коригуючи операції суден у відповідь на екологічні та нормативні дані.

Незважаючи на свої переваги, впровадження ШІ-агентів створює певні труднощі. Технічні обмеження, такі як обчислювальна потужність та затримка, вимагають використання периферійних обчислень та модульних архітектур штучного інтелекту. Етичні та правові невизначеності вимагають створення систем підзвітності та прозорості. Взаємодія та людський нагляд залишаються важливими для забезпечення безперервної інтеграції з портовою інфраструктурою.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hallman K. Artificial Intelligence, Zygotes, and Free Will. *International Journal of Undergraduate Research and Creative Activities*. 2023. Vol. 7: Iss. 2, Article 6. Pp. 1-11.
2. Дячук В. Штучний інтелект: що це і яку несе небезпеку. 2018. *Lifestyle* 24. URL: https://24tv.ua/techno/shtuchniy_intelekt_shho_tse_i_yaku_nese_nebezpeku_n914662
3. Улянівський Т. Штучний інтелект – це продовження еволюції. *ZBRUC*. 2017. URL: <https://zbruc.eu/node/71907>
4. Bahr, A.; Leonard, J.J.; Fallon, M.F. Cooperative Localization for Autonomous Underwater Vehicles. *Int. J. Robot. Res.* 2009, 28, 714–728.
5. Thieme, C.A.; Utne, I.B. A risk model for autonomous marine systems and operation focusing on human–

autonomy collaboration. Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab. 2017, 231, 446–464.

6. Fruth, M.; Teuteberg, F. Digitization in maritime logistics—What is there and what is missing? Cogent Bus. Manag. 2017, 4, 1411066.

7. Kukreja, S.; Besharat, A.; Lee, S.-S. Projective fixed points for non-Fermi liquids: A case study of the Ising-nematic quantum critical metal. Phys. Rev. B 2024, 110, 155142.

8. Koo, K.Y.; Rødseth, Ø.J.; Lislebø, G.; Ulvensøen, J.H. Harmonizing Maritime Innovation: Enhancing International and National Standardization in Intelligent Ship Transport Systems. J. Phys. Conf. Ser. 2024, 2867, 012023.

9. Peng, Z.; Wang, D.; Li, T.; Han, M. Output-Feedback Cooperative Formation Maneuvering of Autonomous Surface Vehicles with Connectivity Preservation and Collision Avoidance. IEEE Trans. Cybern. 2020, 50, 2527–2535.

10. Pedrielli, G.; Xing, Y.; Peh, J.H.; Koh, K.W.; Ng, S.H. A Real Time Simulation Optimization Framework for Vessel Collision Avoidance and the Case of Singapore Strait. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2020, 21, 1204–1215.

11. Zhang, X.; Wang, C.; Chui, K.T.; Liu, R.W. A Real-Time Collision Avoidance Framework of MASS Based on B-Spline and Optimal Decoupling Control. Sensors 2021, 21, 4911.

12. An, Y.; Zhang, Y.; Guo, H.; Wang, J. Compressive Sensing-Based Three-Dimensional Laser Imaging with Dual Illumination. IEEE Access 2019, 7, 25708–25717.

13. Höyhty, M.; Martio, J. Integrated Satellite–Terrestrial Connectivity for Autonomous Ships: Survey and Future Research Directions. Remote Sens. 2020, 12, 2507.

14. Das, P. Optimizing Sensor Integration for Enhanced Localization in Underwater ROVS. IJSREM 2024, 8, 1–6.

15. Robards, M.D.; Silber, G.; Adams, J.; Arroyo, J.; Lorenzini, D.; Schwehr, K.; Amos, J. Conservation science and policy applications of the marine vessel Automatic Identification System (AIS)—A review. Bull. Mar. Sci. 2016, 92, 75–103.

16. Riyadh, M. Transforming the Shipping Industry with Autonomous Ships and Artificial Intelligence. J. Marit. Technol. Soc. 2024, 3, 16–21.

17. Allal, A.A.; Mansouri, K.; Youssfi, M.; Qbadou, M. Reliable and cost-effective communication at high seas, for a safe operation of autonomous ship. In Proceedings of the 2018 6th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), Marrakesh, Morocco, 16–19 October 2018; pp. 1–8.

18. Alamoush, A.S.; Ölçer, A.I. Maritime Autonomous Surface Ships: Architecture for Autonomous Navigation Systems. J. Mar. Sci. Eng. 2025, 13, 122.

19. Бичковський Ю.В., Мельник О.М. (2022). Роль та місце людського елемента у ситуації навалу або зіткнення судна з причалом. Вчені записки ТНУ ім. Вернадського. Технічні науки 33(72) № 1 - С. 270 - 276. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/41>

20. Elnoury, A.; Farag, S. The Impact of Inadequate Maritime Conventions on Implementing Autonomous Ship Technology. AIN J. 2023, 1, 66.

21. Čampara, L.; Hasanspahić, N.; Vujičić, S. Overview of MARPOL ANNEX VI regulations for prevention of air pollution from marine diesel engines. SHS Web Conf. 2018, 58, 01004.

22. Kim, M.; Joung, T.-H.; Jeong, B.; Park, H.-S. Autonomous shipping and its impact on regulations, technologies, and industries. J. Int. Marit. Saf. Environ. Aff. Shipp. 2020, 4, 17–25.

23. Issa, M.; Ilinca, A.; Ibrahim, H.; Rizk, P. Maritime Autonomous Surface Ships: Problems and Challenges Facing the Regulatory Process. Sustainability 2022, 14, 15630.

24. Lentarev, A.A. Analysis of the existing regulations on certification and training of autonomous vessels operators. Jour 2023, 15, 359–373.

REFERENCES

1. Hallman K. Artificial Intelligence, Zygotes, and Free Will. International Journal of Undergraduate Research and Creative Activities. 2023. Vol. 7: Iss. 2, Article 6. Pp. 1-11.

2. Dyachuk V. Shtuchnyy intelekt: shcho tse i yaku nese nebezpeku. 2018. Lifestyle 24. URL: https://24tv.ua/techno/shtuchniy_intelekt_shho_tse_i_yaku_nese_nebezpeku_n914662

3. Ulyaniv's'kyi T. Shtuchnyy intelekt – tse prodovzhennya evolyutsiyi. ZBRUC. 2017. URL: <https://zbruc.eu/node/71907>

4. Bahr, A.; Leonard, J.J.; Fallon, M.F. Cooperative Localization for Autonomous Underwater Vehicles. Int. J. Robot. Res. 2009, 28, 714–728.

5. Thieme, C.A.; Utne, I.B. A risk model for autonomous marine systems and operation focusing on human–autonomy collaboration. Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab. 2017, 231, 446–464.

6. Fruth, M.; Teuteberg, F. Digitization in maritime logistics—What is there and what is missing? Cogent Bus. Manag. 2017, 4, 1411066.

7. Kukreja, S.; Besharat, A.; Lee, S.-S. Projective fixed points for non-Fermi liquids: A case study of the Ising-nematic quantum critical metal. *Phys. Rev. B* 2024, 110, 155142.
8. Koo, K.Y.; Rødseth, Ø.J.; Lislebø, G.; Ulvensøen, J.H. Harmonizing Maritime Innovation: Enhancing International and National Standardization in Intelligent Ship Transport Systems. *J. Phys. Conf. Ser.* 2024, 2867, 012023.
9. Peng, Z.; Wang, D.; Li, T.; Han, M. Output-Feedback Cooperative Formation Maneuvering of Autonomous Surface Vehicles with Connectivity Preservation and Collision Avoidance. *IEEE Trans. Cybern.* 2020, 50, 2527–2535.
10. Pedrielli, G.; Xing, Y.; Peh, J.H.; Koh, K.W.; Ng, S.H. A Real Time Simulation Optimization Framework for Vessel Collision Avoidance and the Case of Singapore Strait. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2020, 21, 1204–1215.
11. Zhang, X.; Wang, C.; Chui, K.T.; Liu, R.W. A Real-Time Collision Avoidance Framework of MASS Based on B-Spline and Optimal Decoupling Control. *Sensors* 2021, 21, 4911.
12. An, Y.; Zhang, Y.; Guo, H.; Wang, J. Compressive Sensing-Based Three-Dimensional Laser Imaging with Dual Illumination. *IEEE Access* 2019, 7, 25708–25717.
13. Höyhty, M.; Martio, J. Integrated Satellite–Terrestrial Connectivity for Autonomous Ships: Survey and Future Research Directions. *Remote Sens.* 2020, 12, 2507.
14. Das, P. Optimizing Sensor Integration for Enhanced Localization in Underwater ROVS. *IJSREM* 2024, 8, 1–6.
15. Robards, M.D.; Silber, G.; Adams, J.; Arroyo, J.; Lorenzini, D.; Schwehr, K.; Amos, J. Conservation science and policy applications of the marine vessel Automatic Identification System (AIS)-A review. *Bull. Mar. Sci.* 2016, 92, 75–103.
16. Riyadh, M. Transforming the Shipping Industry with Autonomous Ships and Artificial Intelligence. *J. Marit. Technol. Soc.* 2024, 3, 16–21.
17. Allal, A.A.; Mansouri, K.; Youssfi, M.; Qbadou, M. Reliable and cost-effective communication at high seas, for a safe operation of autonomous ship. In *Proceedings of the 2018 6th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), Marrakesh, Morocco, 16–19 October 2018*; pp. 1–8.
18. Alamoush, A.S.; Ölçer, A.I. Maritime Autonomous Surface Ships: Architecture for Autonomous Navigation Systems. *J. Mar. Sci. Eng.* 2025, 13, 122.
19. Bychkov's'kyy YU.V., Mel'nyk O.M. (2022). Rol' ta mistse lyuds'koho elementu u sytuatsiyi navalu abo zitknennya sudna z pryhalom. *Vcheni zapysky TNU im. Vernads'koho. Tekhnichni nauky* 33(72) № 1 - C. 270 - 276. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/41>
20. Elnoury, A.; Farag, S. The Impact of Inadequate Maritime Conventions on Implementing Autonomous Ship Technology. *AINJ.* 2023, 1, 66.
21. Čampara, L.; Hasanspahić, N.; Vujičić, S. Overview of MARPOL ANNEX VI regulations for prevention of air pollution from marine diesel engines. *SHS Web Conf.* 2018, 58, 01004.
22. Kim, M.; Joung, T.-H.; Jeong, B.; Park, H.-S. Autonomous shipping and its impact on regulations, technologies, and industries. *J. Int. Marit. Saf. Environ. Aff. Shipp.* 2020, 4, 17–25.
23. Issa, M.; Ilinca, A.; Ibrahim, H.; Rizk, P. Maritime Autonomous Surface Ships: Problems and Challenges Facing the Regulatory Process. *Sustainability* 2022, 14, 15630.
24. Lentarev, A.A. Analysis of the existing regulations on certification and training of autonomous vessels operators. *Jour* 2023, 15, 359–373.

Maranov O.V., Nosovsky A.A.,

MULTI-AGENT MODEL OF INTERACTION OF AUTONOMOUS MARINE PLATFORMS WITH PORT INFRASTRUCTURE

The explosive development of autonomous marine systems based on artificial intelligence agents has exacerbated the problem of real-time provision and coordination, decision-making and compliance with regulatory requirements. The aim of the article is to develop a multi-agent model of interaction of autonomous marine platforms with port infrastructure, which ensures the safety and environmental friendliness of operations. The aim of the article is achieved by the widespread use of artificial intelligence, which performs a number of functions to ensure the safe operation of autonomous vessels in complex marine environments. Each of these functions - navigation, obstacle detection, collision avoidance and real-time decision-making - is of crucial importance. Various artificial intelligence methods are used to support these functions, including machine learning, deep learning, reinforcement learning, computer vision and natural language processing. An overview of AI elements used in maritime safety systems is provided, as well as their advantages and disadvantages in terms of autonomous maritime system performance. A high-level model of the architecture of

AI agents operating in real-time in autonomous ship systems is proposed. This approach integrates modern technologies (sensory functions, perception, decision-making, control and supervision) to ensure safe, efficient and sustainable maritime operations. The model is based on an AI agent that acts as an autonomous entity capable of processing input data, generating context-sensitive decisions and performing safety-critical actions in time-constrained and port-based environments. AI agents not only provide real-time situational awareness through advanced sensor data fusion, but also optimize routing, fuel consumption and maintenance, in line with industry goals for cost reduction and environmental responsibility. The functions of AI agents at each level of the architecture are described in detail. The integration of autonomous ships with intelligent port systems using AI agents allows for improved dynamic planning, reduced port congestion, and faster turnaround times in maritime logistics. Smart ports, enhanced by IoT technologies, big data analytics, and automation, become the foundation for creating a seamless operational continuum between ship and shore.

Keywords: *navigation safety, navigation safety, navigation, emergency situations, ship, ship movement, navigation, traffic management, technical means of navigation, safety at sea, autonomous marine platforms, agent approach, maritime transport, port infrastructure, transport technologies, artificial intelligence*

Стаття прийнята 25.01.2026