

© Муравйов Г. М., Маркітан В. В., Перевертов Д. С.

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОТРИМУВАННЯ ПОВОРОТУ АВТОНОМНОГО СУДНА НА ОБШИРНОМУ МІЛКОВОДДІ

Метою цього дослідження є визначення та підтвердження параметрів моделі автономного судна на обширному мілководді шляхом імітаційного моделювання способом несиметричний зигзаг процесу маневрування для визначення впливу на параметри його руху. Через складні гідродинамічні ефекти в умовах обмеженої глибини, такі як зменшений під кильовий просвіт, підвищений опір та змінені схеми обтікання, змінюється стійкість на курсі. Тому автономні навігаційні системи потребують високоточного планування для організації безаварійного маневрування та безпечної експлуатації судна під час перевезення вантажу. Дослідження вирішує ці проблеми шляхом імітаційного моделювання впливу мілководдя на параметри повороту та його отримування у вигляді емпіричних залежностей. Це дозволило значно підвищити точність планування траєкторних точок і дало можливість використовувати системи підтримки прийняття рішень при маневруванні та використовувати оперативні способи контролю руху способом динамічного позиціонування, приймаючи траєкторні точки як віртуальні буї. При імітаційному моделюванні повороту використовувалась зміна глибини моря, початкового курсу та швидкості судна для оцінки часу затримання початку повороту та відхилення від планової траєкторії. Моделювання продемонструвало, що зі зменшенням глибини води радіус повороту та тактичний діаметр автономного судна значно збільшуються, що помітно впливає на стійкість курсу та затримку реакції. Система управління на основі створеної моделі змогла адаптувати команди траєкторії в режимі реального часу, мінімізуючи відхилення від запланованих траєкторних точок. Модель точно фіксувала асиметричні схеми повороту, типові для мілководдя, та покращувала прогностичні можливості алгоритмів автономної навігації в обмежених умовах. Результати виконаних досліджень підтверджують, що включення динаміки мілководдя до циклу прийняття рішень автономної навігаційної системи значно підвищує безпеку маневрування та точність траєкторії. Розроблена імітаційна модель, яка використовує несиметричний зигзаг, забезпечує надійну основу для майбутніх алгоритмів маневрування та управління рухом в режимі реального часу. Ця структура сприяє безпечнішій та ефективнішій автономній роботі в портах, а також створює умови для подальшої інтеграції прогностичного управління на автономних судах.

Ключові слова: автономне судно, маневрування на мілководді, моделювання поворотів, адаптивна навігація, ефект просідання, управління траєкторією, імітаційне гідродинамічне моделювання способом несиметричний зигзаг.

Вступ. Швидкий розвиток та інтеграція морських електронних навігаційних карт на ходовому містку автономних надводних суден (MASS), створили нові можливості та виклики в галузі сучасного морського транспорту. Одним з найактуальніших питань у цій галузі є аналіз поведінки автономного судна під час маневрування на глибокій воді та обширному мілководді. Ефективна автоматизація цього процесу є важливою для організації безпечного маневрування, експлуатаційної ефективності та здатності судна відповідно реагувати на динамічні та часто непередбачувані умови навколишнього середовища. Проблема стає особливо гострою в умовах обширного мілководдя, де маневрування, особливо під час поворотів, ускладнюються гідродинамічними обмеженнями, такими як зменшення запасу води під кілем, збільшення опору та просідання при нелінійні взаємодії між корпусом та морським дном.

У таких умовах координатне планування не може використовувати статичні моделі маршрутизації; натомість воно повинно базуватися на даних у режимі реального часу. При цьому судно повинно змушене не лише точно враховувати параметри навколишнього середовища, але й адаптувати свій рух

для підтримки безпечних дистанцій до навігаційних небезпек та оптимізації управління маневруванням власного судна з урахуванням зміни глибини, течій та щільності руху зустрічних суден. Ця потреба підкреслює наукову та практичну важливість удосконалення механізмів автоматизації при оперативному координатному плануванні, особливо для маневрування в стиснених водах та аварійно небезпечних ділянках переходу.

Автономні судна, хоча й дедалі частіше використовуються в судноплавній галузі, зустрічаються з критичними проблемами безпеки, особливо в контексті мілководдя, де традиційні моделі планування координат та управління рухом, оптимізовані для глибоких вод, не справляються. Поворот на мілководді є особливо складною операцією через посилений вплив просідання, асиметричного потоку води, яка обтікає корпус судна, та затримка реакції його корпусу на перекладку руля. Щоб вирішити ці проблеми, це дослідження зосереджується на моделюванні маневрів повороту, а також побудови діаграм управління та розрахунку коефіцієнтів на мілководдя для кожного параметру поворотності, шляхом використання імітаційного моделювання на навігаційному тренажері, як компонента покращеного координатного планування. Інтегруючи гідродинамічні ефекти мілководдя в архітектуру управління автономним судном, модель дозволяє адаптивне прийняття рішень, що покращує точність траєкторії та зменшує навігаційні ризики. Результати цієї роботи спрямовані на підтримку безпечніших та ефективніших автономних операцій суден на мілководді, тим самим сприяючи досягненню ширших цілей сталого розвитку, навігаційної надійності та інновацій у автономних суден морського транспорту.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процес руху автономних надводних суден на обширному мілководді. Тому організація навігаційної безпеки в таких районах характеризується складністю через вплив мілководдя на стан судна, маневрені характеристики та його рух, обмеження суднохідної акваторії маневрування, та підвищений ризик посадки на мілину або зіткнення з другими суднами. Такий вплив мілководдя вимагає підвищеного рівня навігаційної точності визначення параметрів руху та адаптивності, який перевищує традиційні методології планування маршруту на глибокій воді, особливо для суден, що працюють без прямого людського контролю на судні.

Предметом дослідження є визначення параметрів поворотності і отримання повороту шляхом імітаційного моделювання несиметричного зигзагу і його використання при плаванні автономного судна в умовах мілководдя, з особливим акцентом на покращення стратегій координатного планування та управління. Поворот є одним з найвимогливіших маневрів у контексті мілководдя, через нелінійний та глибинно-залежний характер гідродинамічних взаємодій. Предмет дослідження охоплює розробку та випробування імітаційної моделі, яка включає зворотний зв'язок щодо навколишнього середовища в режимі реального часу, ефекти просідання, зміни опору, викликані глибиною, та адаптивні механізми прийняття рішень. У дослідженні також розглядається, як удосконалені системи планування координат, інтегровані в контур управління маневруванням, можуть підтримувати автономне прийняття рішень під час маневрування в обмежених стиснених умовах. Це включає оцінку того, як прогнозування траєкторії, управління рульом/рульовим механізмом та корекцію курсу через зменшення глибини води та змінної топографії морського дна.

Ефективність цих алгоритмів управління оцінюється за допомогою верифікації, шляхом імітаційного моделювання, для відображення реалістичних сценаріїв мілководдя. Дослідження безпосередньо сприяє вирішенню практичних проблем автономної роботи в неідеальних умовах, розділу науки, який все ще недостатньо представлений в сучасних рамках MASS. Аналізуючи процес повороту в ширшому контексті циклу рейсу, дослідження підтримує розвиток інтелектуальних систем планування координат руху при маневруванні, здатних підтримувати високий рівень безпеки, надійності та енергоефективності. Зрештою, ця робота спрямована на подолання розриву, між теоретичними моделями планування процесу маневрування та фактичним маневруванням, підтримуючи перехід MASS від випробувань у відкритому морі до складних реальних умов стиснених вод, таких як порти та припортові райони.

Мета і задачі дослідження. Метою статті являється виконання експерименту імітаційного моделювання, детальний аналіз його результатів та побудова діаграм керованості і характеристик отримання поворотів, а також розрахунок емпіричних коефіцієнтів, які необхідні для визначення

параметрів діаграми керованості, зони її нестійкості та характеристик кута та часу отримання поворотів на обширному мілководді. Мета дослідження потребує виконати наступні завдання:

1. Виконання імітаційного моделювання маневрування автономного судна на обширному мілководді з використанням навігаційного тренажера.

2. Розрахунок коефіцієнтів мілководдя для визначення зони нестійкості, параметрів отримання повороту і побудова діаграм керованості для автономного судна на обширному мілководді і їх використання.

3. Розробка змістовної моделі маневрування автономного судна з урахуванням використання діаграм керованості у вигляді удосконаленої таблиці ШТ.

Аналіз літературних джерел. Перехід на електронні карти суден всього світу з 2018 року, призвів до розробки маневреного буклета і представлення даних про маневрені властивості судна у вигляді двох таблиць, характеристик гальмування і повороткості для стану в баласті і вантажі, які зручні для використання в навігаційному комп'ютері і компактні [1]. В цьому разі всі дані про маневрені характеристики представлені у вигляді таблиць гальмування і повороткості для стану у вантажі і баласті і поміщаються на двох листках паперу формату А4. Для визначення маневрених характеристик для поточного стану в рейсовому циклі, необхідно інтерполювати параметри по даним таблиць у вантажі та баласті і вводити в навігаційний комп'ютер відповідні дані.

У статті [2] представлено технічне та аналітичне дослідження реакцій на зигзагоподібний маневр у спрощених лінійних моделях руху судна по осі Х. Це дослідження сприяє фундаментальному розумінню динаміки судна, зокрема в контексті керування та маневреності, які є вирішальними як для звичайних, так і для автономних навігаційних систем. У статті розглядаються математичні та фізичні особливості, що виникають під час застосування лінійних диференціальних рівнянь для моделювання зигзагоподібних маневрів — стандартного тесту для оцінки маневрених можливостей судна. Хоча лінійні моделі широко використовуються на ранніх стадіях проектування управління та аналізу руху судна, завдяки своїй простоті та обчислювальній ефективності, вони часто недостатньо досліджуються на предмет поведінки на межі або постійної часу затримки повороту і реакції судна на управляючі дії.

Стаття має на меті заповнити недолік знань про особливості управління в умовах мілководдя, шляхом виявлення та аналізу конкретних аномалій та обмежень параметрів маневрування, що виникають у цих моделях під час моделювання зигзагоподібного руху. Автор досліджує динаміку ризику, використовуючи лінійну модель Номото (версії першого та другого порядку), застосовуючи її для моделювання стандартних зигзагоподібних тестів.

Порівнюючи результати моделювання та оцінюючи фазові співвідношення між вхідними даними руля та реакцією судна на ризику, дослідження систематично дозволяє визначити випадки, коли параметри моделі відрізняються від очікуваного значення або фізично реалістичної поведінки. Особлива увага приділяється випадкам неколивального руху та затримки стаціонарної реакції, що може спотворювати інтерпретацію характеристик керованості судна. У статті встановлено, що певні налаштування параметрів у лінійних моделях, можуть призводити до особливої або неінтуїтивної поведінки під час зигзагоподібного моделювання, а саме затримка початку реакції судна на перекладку руля, або завищена здатність до повороту, чутливість до налаштування параметрів, коли невеликі зміни гідродинамічних коефіцієнтів суттєво впливають на параметри руху і моделі. У дослідженні наголошується, що хоча лінійні моделі можуть забезпечити базове якісне уявлення, їх слід використовувати з обережністю в дослідженнях маневреності, особливо під час проектування або перевірки алгоритмів авторульового та управління для реальних або автономних суден.

Таким чином визначено, що використання виключно лінійних моделей руху по осі ризику може призвести до оманливих висновків в оцінках маневреності. Для високоточних застосувань, таких як автономне управління судном або точні середовища моделювання, слід розглядати нелінійне моделювання або гібридні підходи.

Стаття [3] є знаковим внеском у галузь маневрування та управління суднами. Автор створив систематичну основу для інтерпретації результатів стандартних маневрених випробувань, зокрема симетричного зигзагоподібного тесту 20x20x20, за допомогою спрощеного математичного моделювання. Основною метою цієї роботи було перетворити емпіричні оцінки рульового управління

на кількісно вимірювану та повторювану процедуру, яку можна було б використовувати для оцінки та порівняння різних конструкцій суден та їхніх характеристик поворотності. В основі роботи лежить концепція абстрагування динаміки ризику судна в лінійну модель, яка могла б приблизно описати, як судно реагує на переключення руля з часом. Він проаналізував стандартний зигзагоподібний маневр Кемпфа та запропонував ідею моделювання поведінки судна щодо ризику за допомогою спрощеного набору параметрів, які могли б описати курсову стійкість та реакцію судна на поворот. Ця модель дозволила виразити основну поведінку рульового управління судном, використовуючи лише кілька ключових показників, тим самим значно спростивши процес визначення маневрених характеристик. Одним із головних внесків була пропозиція «індексів якості управління» — параметрів, які об'єктивно кількісно оцінюють характеристики повороту судна, включаючи час затримки реакції судна на переключення руля, початкового курсу.

Незважаючи на лінійний характер моделі, підхід автора виявився ефективним для фіксації основної динаміки багатьох традиційних суден, особливо в умовах спокійної води та низької швидкості. Хоча модель не враховує нелінійну поведінку, вплив мілководдя або збурення навколишнього середовища, її цінність полягає в забезпеченні стабільної еталонної моделі для раннього аналізу та налаштування системи управління. Сьогодні, в контексті MASS (морських автономних надводних суден), модель Номото часто вбудовується в середовища моделювання вищого порядку або використовується як спрощений прогнозний контролер у навігаційних системах на основі штучного інтелекту.

У роботі [4] виконано критичний аналіз параметрів маневреності, зокрема коефіцієнта посилення Номото та індексів маневрування Норбіна, у поведінці суден під час повороту. Метою дослідження є аналіз впливу коефіцієнта посилення Номото (K) та індексів маневрування Норбіна на реакцію судна на поворот з метою підвищення точності прогнозування в навігаційних тренажерах маневрування. Досліджуючи математичну та фізичну значущість цих параметрів, дослідження сприяє кращому розумінню курсової стійкості та чутливості управління судном.

Аналіз автора використовує дані маневрування, які зазвичай отримуються зі стандартних тестових маневрів, таких як траєкторії повороту, та використовує модель Номото для отримання значень посилення, які представляють реакцію на ризику на одиницю вхідного сигналу переключення руля. У дослідженні також приведені індекси Норбіна, які пропонують додаткове розуміння якісної поведінки траєкторій повороту, зокрема того, наскільки різко та послідовно судно реагує на команди руля. Підхід є значною мірою порівняльним та аналітичним: автор оцінює різні значення цих параметрів та оцінює їхній вплив на радіус повороту, просування та тактичний діаметр. Коефіцієнт посилення Номото безпосередньо впливає на те, наскільки швидко судно починає повертати у відповідь на команду руля. Більше посилення відповідає швидшій реакції, але також може вказувати на меншу курсову стійкість.

Спільне використання параметрів Номото та Норбіна дозволяє отримати більш точне значення маневрених характеристик судна, особливо під час критичних маневрів, таких як поворот у стиснених водах. У контексті вдосконалення маневрування автономних суден такі параметри можуть служити основними змінними налаштуваннями для систем автокерма або алгоритмів управління на основі використання штучного інтелекту.

У статті [5] представлено розробку інструменту прогнозування маневрування, спеціально розробленого для торговельних суден, зосереджуючись на підвищенні точності та ефективності прогнозування поведінки судна під час стандартних маневрових операцій. Метою дослідження є покращення прийняття рішень у навігації та управлінні за допомогою інструменту на основі моделей, який може прогнозувати траєкторію та характеристики повороту судна за різних експлуатаційних умов. Автори використовують гідродинамічні моделі засновані на лінійних або напівемпіричних моделях, таких як модель Номото або її похідні, для моделювання маневрової поведінки судна, такої як круги повороту та зигзагоподібні випробування. Інструмент прогнозування включає основні вхідні параметри, такі як кут повороту керма, швидкість судна та початковий курс, для обчислення очікуваних траєкторних реакцій. Інструмент дозволяє швидко та надійно моделювати маневрування торговельних суден, допомагаючи операторам суден, конструкторам та морським інженерам оцінювати маневреність без проведення масштабних фізичних випробувань. Хоча інструмент є ефективним, він обмежений у

врахуванні нелінійної гідродинамічної поведінки, такої як та, що виникає при великих кутах керма, на мілководді або в умовах асиметричного навантаження.

У роботі [6] представлено стандартний метод Modular Mathematical Model Group (МММГ) — підхід до прогнозування маневрової поведінки судна. Розроблений як спільна платформа для досліджень маневрування, особливо при використанні методу МММГ забезпечує модульну структуру, яка дозволяє адаптуватися до процесу руху та точно прогнозувати координати судна під час таких маневрів, як поворотні кола, зигзагоподібні випробування та зупинки при аварійному збої. Метою дослідження є отримання параметрів системи управління маневруванням та складових елементів для валідації моделі МММГ. Вона базується на концепції модульності, де гідродинамічні сили, що діють на корпус, гвинт та руль моделюються окремо. Кожен компонент аналізується на основі емпіричних даних, теоретичних формулювань або експериментальних випробувань (наприклад, випробування модельного басейну), що дозволяє використовувати більшу частину налаштування для різних типів та конфігурацій суден. У статті наведено вичерпне пояснення рівнянь руху, моделей гідродинамічних сил, а також того, як вони виводяться та налаштовуються. У ньому підкреслюється, що модель МММГ дозволяє реалістично моделювати маневрену поведінку судна, зберігаючи при цьому управляєму складність, що робить її придатною для застосування як під час аналізу на стадії проектування, так і при розробці систем управління в реальному часі. Вона підтримує точне відтворення стандартних маневрених випробувань ІМО та розширюється для складніших умов, таких як мілководдя, вплив вітру або течій. Для вдосконалення методів маневрування автономних суден модель МММГ є однією з найбільш підходящих та надійних моделей маневрування. Вона пропонує точність, необхідну для безпечного прогнозування траєкторії та калібрування логіки управління, особливо під час низько швидкісних, високоточних маневрів, таких як швартування, поворот у обмежених водах або дії по ухиленню від зіткнення.

Теорія і практика безпечного управління судном і його експлуатацією, як відмічається в роботі [7] присвячена проблемі маневрування суден, його плануванні, включаючи криволінійні траєкторії. Показано, що це вимагає застосування змістовних та формалізованих моделей при плануванні координат руху та високоточного управління маневруванням для забезпечення гарантованої безпеки судноплавства. Уточнюються характеристики елементів маневрування, їх взаємозв'язок і відносини для розширення теоретичних знань. Обговорюються загальні принципи синтезу складних систем підтримки прийняття рішень в екстремальних ситуаціях.

Підкреслюється, що процес організації перевезення вантажів є складним багатоплановим процесом, який формується під впливом багатьох аспектів, таких як: науковий; технологічний; технічний; ергономічний; економічний; екологічний; соціальний та юридичний.

Науковий аспект домінує при розробці нормативних документів, змістовних і формалізованих моделей управління процесом експлуатації судна.

Технологічний аспект - при забезпеченні безпечного дотримання технології виробничих робіт під час експлуатації судна, так як навіть досить ретельно розроблені технологічні нормативи, через конструктивні недоробки, порушення технологічних вимог, недостатнього контролю над безпекою мореплавства з боку екіпажу і берегових служб призводять, як правило, до аварійної ситуації.

Технічний аспект управління включає забезпечення безвідмовної роботи судових технічних засобів, оскільки сучасні судна представляють складні інформаційно-енергетичні та ресурсні комплекси, що знижують рівень надійності, змушуючи резервувати та дублювати механізми та пристрої.

Ергономічний аспект управління забезпечує оптимальне розподіл ступеня участі у виробничій діяльності людини та технічних засобів, спрямоване на оптимізацію режимів роботи транспортного процесу.

Юридичний аспект управління визначає роль та відповідальність учасників транспортного процесу, розробку відповідної нормативної документації з безпеки судноплавства.

Соціальний аспект управління викликаний необхідністю використання водного простору як транспортної артерії та джерела отримання ресурсів для забезпечення життєдіяльності.

Науковий, технічний і технологічний аспекти в сукупності формують вимоги до характеристик і конструктивних особливостей судна.

Навігаційна безпека є основним параметром, який характеризує експлуатацію порту, і є найважливішою умовою ефективної його експлуатації, відмічається в роботі [8]. У свою чергу, морські порти вимагають особливого підходу до організації безпечної їх експлуатації. Досить багато аварій в портах відбуваються через неузгодженість в діях учасників багато операторної системи управління маневруванням судна, що включає: капітана судна; капітанів буксирів; обслуговуючого персоналу порту; берегової системи управління рухом і недостатньої точності планування координат шляху руху судном і лоцманської службою при заході / виході.

У портах і на підводних водних шляхах вплив зовнішніх навігаційних факторів може призвести до виникнення навігаційних аварій через обмежений простір для маневрування суден і інтенсивного судноплавства. Використовуючи моделі організації руху, що застосовуються у відкритому морі, ці інциденти можна прогнозувати заздалегідь. Однак методика планування шляху у відкритому морі не може бути використана при заході/виході з порту. Для планування координат при заході/виході з порту повинні використовуватись високоточні способи планування шляху траєкторними точками по координатах шляхових точок, знання маневрених характеристик для поточного стану судна, яке заходить, ступені мілководдя і геометрії акваторії порту для маневрування. Для верифікації запропонованих моделей було проведено натурні радіолокаційні спостереження береговими засобами порту Чорноморськ за траєкторіями руху суден при заході та виході з порту. Але дані про мілководдя при маневруванні суден не розглядалися.

У роботі [9] описується автоматизація процесу планування координат шляху автономного судна в рейсовому циклі з урахуванням зовнішніх і внутрішніх факторів, що впливають на рух. Розглядається організація маневрування в складних умовах плавання, робота в перевантажених зонах та оптимізація маршруту для підвищення безпеки і ефективності перевезень. Висвітлюються особливості використання сучасних сенсорів, навігаційних систем і технологій автоматизації для забезпечення надійного управління судном. Наведено огляд рішень щодо врахування навігаційних ризиків, визначення шляхових і траєкторних точок, а також аналіз технічних, навігаційних і кібернетичних ризиків. Описано принципи побудови схем маневрування, підготовки до рейсу та організації безпечного проходження аварійно небезпечних районів із урахуванням характеристик судна та умов плавання.

Науковий аспект – розробка алгоритмів планування координат (RRT*, квадродрева, графіка видимості) з підвищеною точністю та врахуванням навігаційних ризиків, а також вивчення моделей для аналізу навігаційної ситуації (математичні моделі, фільтр Калмана, ПД-регулятор).

Технологічний аспект включає забезпечення автоматизацією процесу прокладки маршруту та маневрування замість ручної роботи штурмана та використання алгоритмів для уникнення зіткнень та роботи в перевантажених зонах (порти, вузькі протоки).

Технічний аспект враховує опис датчиків і систем автономного керування, резервування функцій та дублювання обладнання для підвищення надійності та врахування технічних параметрів судна при побудові маршруту.

Соціальний аспект викликаний зменшенням людського фактору в судноплавстві й підвищення безпеки для екіпажу та навколишніх суден.

Юридичний аспект – у роботі згадується про відповідальність у контексті управління ризиками та кіберзагроз з використанням норм ІМО чи національних регламентів.

Науковий, технічний і технологічний аспекти в сукупності формують вимоги до характеристик і конструктивних особливостей судна.

У роботі [10] описується розробка та випробування системи управління автономними суднами, побудованої на основі оцінки ризиків у режимі реального часу. Розглядається ієрархічна структура контролю, що включає модулі навігації, автоматичного керування та управління силовими установками, які взаємодіють через наглядний ризик-контролер. Наведено підхід до виявлення небезпечних подій і прогнозування ризику з використанням моделей стану, інтегрованих з даними навігаційних карт та сенсорів. Пояснюються режими роботи судна, алгоритми реагування на зміну рівня ризику та способи перевірки безпеки за допомогою моделювання й формальних методів. Окрема увага приділяється можливостям адаптивного управління, тестуванню системи в різних сценаріях і забезпеченню безпечної взаємодії між автоматизованими системами та оператором.

Науковий аспект - використання методології STPA для ідентифікації небезпечних подій і Bayesian Belief Network для побудови онлайн-моделі ризику й розробка підходу до інтеграції ризик-орієнтованих моделей у системи високорівневого контролю (Supervisory Risk Controller, SRC).

Технологічний аспект – створення ENC-модуля для автоматичної обробки електронних навігаційних карт і врахування відстані до мілководдя/берега, автоматичне тестування контролера з симуляціями для виявлення різних сценаріїв та інтеграція даних із сенсорів (GNSS, AIS, радар) у ризик-модель у реальному часі.

Технічний аспект – використання ієрархічної структури та опрацювання сценаріїв відмов систем і неправильних команд.

Юридичний аспект є орієнтування на підвищення безпеки, що відповідає вимогам ІМО та класифікаційних товариств, а також розглядаються сценарії, які важливі для сертифікації та тестування.

Методи дослідження. Перехід на електронні карти суден всього світу з 2018 року, призвів до розробки маневреного буклета і представлення даних про маневрені властивості судна у вигляді двох таблиць, характеристик гальмування і поворотності для стану в баласті і вантажі, які зручні для використання в навігаційному комп'ютері і компактні [3]. В цьому разі всі дані про маневрені характеристики представлені у вигляді таблиць гальмування і поворотності для стану у вантажі і баласті і поміщаються на двох листках паперу формату А4. Для виконання досліджень був використаний сертифікований навігаційний тренажер Navi-Trainer Professional NTPro 5000.

На ньому було виконано імітаційне моделювання руху автономного судна т/х «Yara birkeland», при маневруванні на обширному мілководді способом несиметричний зігзаг, для визначення діаграми поворотності, зони її нестійкості та характеристик отримання повороту на глибокій воді і обширному мілководді. По результатам досліджень були визначені емпіричні коефіцієнти для розрахунку параметрів поворотності, діаграми керованості і зони її нестійкості та отримання повороту на мілководді для других суден.

Результати досліджень. Організація навігаційної безпеки морських автономних надводних суден (MASS) полягає в дотриманні нормативних вимог ММО[11-13]. Технологічний прогрес в області автономних суден вимагає перегляду існуючих правил і стандартів, щоб вони відповідали новим викликам. Проте цей процес є складним через відсутність консенсусу, щодо найкращих практик та невизначеності, пов'язаної зі швидким розвитком технологій. Створення ефективної нормативної бази вимагає глибокого розуміння потенційних ризиків і обмежень автономних суден при їх експлуатації. Тому процес моделювання руху автономного судна на обширному мілководді при імітаційному моделюванні повороту та його отримання являється єдиним інструментом визначення параметрів впливу мілководдя на маневрені характеристики та його управління. Процес маневрування автономного судна включає декілька етапів. Першим є збір даних про судно та виконання дистанційного автономного управління із берегового поста, шляхом використання датчиків на судні, супутникових знімків процесу маневрування з визначенням місця руху та електронні карти. Ці дані обробляються за допомогою вдосконалених алгоритмів, які аналізують рух судна відносно планових траєкторних координат, та врахування стан навколишнього середовища для виявлення потенційних загроз.

Наступним етапом є прийняття рішень, що передбачає визначення діаграм управляємості з урахуванням характеристик судна, таких як його маневреність. Планування повороту є динамічним процесом, що потребує синхронізації між технологіями обробки даних і реальними умовами навігації. Воно дозволяє уникати небезпек і покращує ефективність автономної навігації. Наприклад, виявлення підводних об'єктів у реальному часі допомагає скоротити ризик посадки на мілину, що є критично важливим для роботи суден у складних умовах, таких як порти, припортові акваторії канали та фарватери. Використання тренажерної підготовки дозволяє підготувати судоводія до оперативного контролю за дистанційним маневруванням, своєчасно прогнозувати потенційні ризики, ґрунтуючись на використанні систем підтримки прийняття рішень та оперативного контролю поточного стану при наявності високоточного планування переходу в рейсовому циклі траєкторними точками (ТТ) по таблиці шляхових точок.

Але виконання такої підготовки можливо тільки при наявності даних про вплив мілководдя на маневрові характеристики, які суттєво впливають на точність розрахунку ТТ. Для отримання таких

даних виникла потреба виконання імітаційного моделювання і визначення емпіричних залежностей для визначення діаграми керованості, параметрів зони нестійкості та параметрів отримання повороту для автономних суден. Тому імітаційне моделювання являється єдиним способом отримання необхідних коефіцієнтів впливу обширного мілководдя на маневрені характеристики автономного судна і важливим кроком у досягненні навігаційної безпеки експлуатації автономного судна при дистанційному його управлінні [14,15].

До характеристик керованості відносяться два види параметрів – стійкості і повороткості. Стійкість на курсі характеризують: постійна часу затримки повороту $T(\delta)$; стійкість яка описується критерієм Q ; зона нестійкості $\pm\omega_0$, $\pm\delta_0\rho$; параметри отримання повороту, час $t_0(\delta)$ і кут $\Theta_0(\delta)$.

До характеристик повороткості відносять геометричні параметри кривої циркуляції - зсув $\ell_1(\delta)$; пряме зміщення, $\ell_2(\delta)$; тактичний діаметр $D_t(\delta)$; діаметр сталої циркуляції $D_u(\delta)$; період циркуляції $T(V, \delta)$.

Особливістю великотоннажних суден являється доповнення до викладеного вище, необхідністю розглядати додатково ще один параметр – зворотне зміщення $\ell_3(\delta)$. Для звичайних суден його, як правило, навіть не розглядають. Причиною тому є його мала величина, яка порівнянна з точністю траскторних вимірювань. З цих причин виявити його $\ell_3(\delta)$ при натурних випробуваннях практично не можливо.

Кількість характеристик гальмування і форма їх представлення, які повинні бути на судні, визначаються рекомендаціями ММО та вимогами національних нормативних документів України (РШСУ - 98). При призначенні режиму руху судна використовують умовний поділ всієї потужності головного двигуна на частини, рівні 0.7, 0.5, 0.3 від режиму повного переднього ходу.

Для позначення режимів руху будемо використовувати умовні позначення, які рекомендовані РШСУ -98: ПП - передній повний хід; ППм - передній повний маневрений хід; ПС - передній середній хід; ПМ - передній малий хід; ПСМ - передній самий малий хід; ЗП - повний задній хід; ЗС - задній середній хід; ЗМ - малий задній хід; ЗСМ - задній самий малий хід.

Сьогодні на судах широко впроваджена рекомендація ММО про складання, до виходу з порту, судового плану переходу з деталізацією всіх етапів руху судна від причалу до причалу. Для автономного судна зазначений план обов'язковий, однак побудувати його при відсутності відповідних даних про маневрені властивості неможливо.

У той же час вимоги, які містяться в Резолюції ММО А. 751 (18), прийнятої 4 листопада 1993 року, а також 2003 року не визначають обсяг і кількість даних, які повинні бути на судні. Вони містять вимоги, які скоріше можна віднести до тих, при яких повинні проектуватися судна, іншими словами нормують їх значення. Судноводій зазвичай працює на судні, яке вже побудовано, і він повинен визначати значення параметрів і враховувати ті характеристики, якими воно володіє.

У зв'язку з необхідністю обробки великої кількості інформації була проведена систематизація способів подання даних про параметри судна і його пристроїв, які забезпечують маневрені властивості судна. і виконано аналіз способів представлення даних про характеристики та прийняли форму представлення даних у вигляді таблиць, запропоновану проф. Мальцевим А.С., яка зручна для обробки кібернетичними пристроями. Поряд з зручністю роботи комп'ютера було запропоновано способи представлення даних з таким розрахунком, щоб судноводій міг використовувати необхідну інформацію при управлінні судном на містку. При цьому після завантаження рекомендується виконати інтерполяцію характеристик гальмування і повороткості для поточного стану в навігаційний комп'ютер, що дозволить оперативно визначати дані для коригування руху. За способом визначення коефіцієнтів диференціального рівняння, яке описує рух судна, розрізняють: експериментальний; розрахунковий; експериментально-розрахунковий. Лінійні графіки ММО мають ту ж інформативність, що і $V(t)$ і $S(t)$. Однак вони незручні в роботі через труднощі інтерполяції при вибірці t і V на нелінійній шкалі. Вони громіздкі, потрібно 5 листів по 20 характеристик на кожному. Незважаючи на те, що вони рекомендовані ММО і потрібно їх наявність на судні, трудомісткість процесу вибірки великої кількості даних, відсутність їх для використовуваних режимів роблять недоцільним їх розглядати для планування координат руху. Нерівномірна шкала швидкості і часу не дозволяє зробити якісно інтерполяцію.

Параметри циркуляції т/х «Yara birkeland» на мілководді приведені в табл.1.

Таблиця 1 – Параметри циркуляції т/х «Yara birkeland» на мілководді

Кут перекладки руля	Параметр	Умовне позначення	Коефіцієнт мілководдя Н/Т=1.2	Коефіцієнт мілководдя Н/Т=1.4	Коефіцієнт мілководдя Н/Т=1.6	Коефіцієнт мілководдя Н/Т=1.8	Коефіцієнт мілководдя Н/Т=2.0
5	Зсув	11	7.89	10.20	13.09	16.55	20.58
	Пряме зміщення	12	11.40	16.22	22.22	29.38	37.72
	Тактичний діаметр	Dт	20.88	28.85	38.58	50.07	63.33
	Сталий	Dу	16.57	22.56	29.54	37.53	46.51
10	Зсув	11	5.49	7.11	9.12	11.53	14.34
	Пряме зміщення	12	7.34	10.44	10.44	18.91	24.28
	Тактичний діаметр	Dт	13.62	18.82	25.17	32.66	41.31
	Сталий	Dу	10.60	14.43	18.90	24.01	29.76
15	Зсув	11	4.42	5.72	7.33	9.27	11.53
	Пряме зміщення	12	5.53	7.87	7.87	14.26	18.30
	Тактичний діаметр	Dт	10.42	14.40	19.26	25.00	31.61
	Сталий	Dу	7.97	10.84	14.20	18.04	22.36
20	Зсув	11	3.79	4.90	6.29	7.95	9.89
	Пряме зміщення	12	4.48	6.37	6.37	11.54	14.82
	Тактичний діаметр	Dт	8.49	11.73	15.69	20.37	25.76
	Сталий	Dу	6.38	8.69	11.38	14.46	17.92
25	Зсув	11	3.35	4.33	5.55	7.02	8.73
	Пряме зміщення	12	3.73	5.30	5.30	9.60	12.33
	Тактичний діаметр	Dт	7.19	9.94	13.29	17.25	21.82
	Сталий	Dу	5.30	7.22	9.45	12.01	14.88
30	Зсув	11	3.04	3.93	5.05	6.38	7.94
	Пряме зміщення	12	3.20	4.55	4.55	8.24	10.58
	Тактичний діаметр	Dт	6.23	8.60	11.51	14.93	18.89
	Сталий	Dу	4.50	6.12	8.02	10.18	12.62
35	Зсув	11	2.78	3.59	4.61	5.83	7.25
	Пряме зміщення	12	2.79	3.96	3.96	7.18	9.21
	Тактичний діаметр	Dт	5.50	7.59	10.15	13.18	16.67
	Сталий	Dу	3.89	5.29	6.93	8.80	10.91

Кут перекладки руля	Параметр	Умовне позначення	Коефіцієнт мілководдя Н/Т=1.2	Коефіцієнт мілководдя Н/Т=1.4	Коефіцієнт мілководдя Н/Т=1.6	Коефіцієнт мілководдя Н/Т=1.8	Коефіцієнт мілководдя Н/Т=2.0
5	Зсув	11	7.89	10.20	13.09	16.55	20.58
	Пряме зміщення	12	11.40	16.22	22.22	29.38	37.72
	Тактичний діаметр	Dт	20.88	28.85	38.58	50.07	63.33
	Сталий діаметр	Dу	16.57	22.56	29.54	37.53	46.51
10	Зсув	11	5.49	7.11	9.12	11.53	14.34

Для співставлення поворотності різних суден радіус циркуляції виражають у безрозмірному вигляді.

$$\bar{R} = \frac{R_{уст}}{L} \quad (1)$$

де \bar{R} – відносний радіус; L – довжина судна.

Величина, зворотна радіусу, називається кривизною. Її також зручно виражати у безрозмірному вигляді:

$$\bar{\omega} = \frac{L}{R_{уст}} = \frac{1}{R} \quad (2)$$

де $\bar{\omega}$ – безрозмірна кутова швидкість.

Для отримання вказаних характеристик на автономному судні «Yara birkeland» в вантажі було проведено імітаційне моделювання щодо визначення характеристик отримання повороту. Перед цим була проаналізована робота Мальцева А.С. про несиметричний зигзаг та відібрані необхідні поєднання кутів перекладки та одержання. Перелік використаних маневрів наведено у табл. 2. При позначенні маневрів використовувався дріб, перша цифра якого позначає кут перекладки руля на початку циркуляції, друга при отриманні та третя - кут повороту, на який повинно повернути судно до моменту виходу на заданий курс.

Таблиця 2 – Несиметричний зигзаг визначення характеристик отримання повороту і діаграми керованості

Кут пере-кладки для	Кут перекладки для входу в циркуляцію $\delta_{вх}$				
	5	10	15	20	30
5	5/5/20	10/5/20	15/5/20	20/5/20	30/5/20
10	5/10/20	10/10/20	15/10/20	20/10/20	30/10/20
15	5/15/20	10/15/20	15/15/20	20/15/20	30/15/20
20	5/20/20	10/20/20	15/20/20	20/20/20	30/20/20
30	5/30/20	10/30/20	15/30/20	20/30/20	30/30/20

Для досягнення визначеної мети в роботі випробувальні маневри несиметричного зигзагу автономного судна з урахування впливу обширного мілководдя на його поворотність і використання систем підтримки прийняття рішень для контролю маневрування в небезпечних ділянках переходу, які приведені в табл. 2.

Для оцінки впливу мілководдя на динамічні властивості судна було проведено випробування щодо визначення характеристик отримання повороту для автономного судна «Yara birkeland», які дозволили отримати результати наведені у табл. 3. Також треба підкреслити потребу оцінки впливу мілководдя на параметри отримання повороту, оскільки автономне судно при дистанційному управлінні рухом повинно автоматично перекладати руль та своєчасно виконувати зворотну перекладку руля для отримання повороту.

Таблиця 3 – Характеристики отримання повороту «Yara birkeland»

Кут для входу в циркуляцію		Параметр	Кут перекладки для отримання повороту									
			Обширне мілководдя (H/T = 1.1)					Глибока вода				
			5	10	15	25	35	5	10	15	25	35
праворуч	5	Θ0	13,5	7,5	5,4	3,9	2,7	9,5	4,8	3,5	2,9	2,8
		T0, хв	1,45	0,55	0,5	0,4	0,3	3,0	2,0	1,3	1,25	1,1
	10	Θ0	16,0	12,9	11,5	10,5	10,4	21,0	15,4	10,1	9,0	7,7
		T0, хв	2,8	1,75	1,15	0,9	0,85	3,45	1,85	0,95	0,85	0,8
	15	Θ0	21,0	17,1	14,8	12,6	11,5	29,4	18,8	16,5	14,3	12,1
		T0, хв	4,1	2,0	1,7	1,65	1,5	4,65	2,4	1,95	1,55	1,2
	25	Θ0	33,2	28,1	26,0	24,5	23,5	36,5	25,4	18,3	17,2	16,0
		T0, хв	5,0	2,7	1,85	1,7	1,55	5,2	2,95	1,9	1,8	1,75
	35	Θ0	47,2	36,4	33,2	32,2	32,0	52,1	42,3	37,1	36,5	36,0
		T0, хв	6,1	3,25	3,0	2,75	2,5	6,4	3,7	3,0	2,8	2,6
ліворуч	5	Θ0	8,2	4,5	4,1	3,5	3,3	17,1	8,1	5,8	5,2	5,1
		T0, хв	2,2	2,0	1,8	1,7	1,5	2,85	1,4	1,1	0,9	0,7
	10	Θ0	13,1	10,2	8,4	7,3	6,5	20,4	14,6	8,9	8,8	8,3
		T0, хв	3,2	1,8	1,6	1,2	1,0	3,6	1,95	1,2	0,95	0,8
	15	Θ0	19,7	15,2	11,9	8,8	8,1	38,4	24,1	16,6	14,9	12,1
		T0, хв	3,9	2,45	2,1	1,45	1,2	4,8	1,95	1,5	1,2	1,05
	25	Θ0	36,5	27,2	22,0	21,4	18,9	47,1	39,4	32,0	30,9	28,8
		T0, хв	4,6	2,45	2,0	1,85	1,7	4,7	2,6	1,7	1,6	1,55
	35	Θ0	44,5	36,1	30,5	29,1	28,0	58,1	46,2	33,1	32,0	31,5
		T0, хв	5,6	2,85	1,9	1,8	1,75	5,8	2,9	2,5	2,0	1,9

Нижче на рис. 1. та рис.2 приведені діаграми керованості і таблиці параметрів керованості автономного судна на глибокій воді та на обширному мілководді, табл. 4 і табл.5. Крім того на діаграмах керованості можна визначити параметри зони нестійкості $\pm\bar{\omega}_0$, $\pm\delta_{op}$.

Виконаний аналіз результатів моделювання показав, що на малих кутах перекладки руля при вході в поворот кут отримання повороту на мілководді збільшується при всіх вищезазначених кутах перекладки.

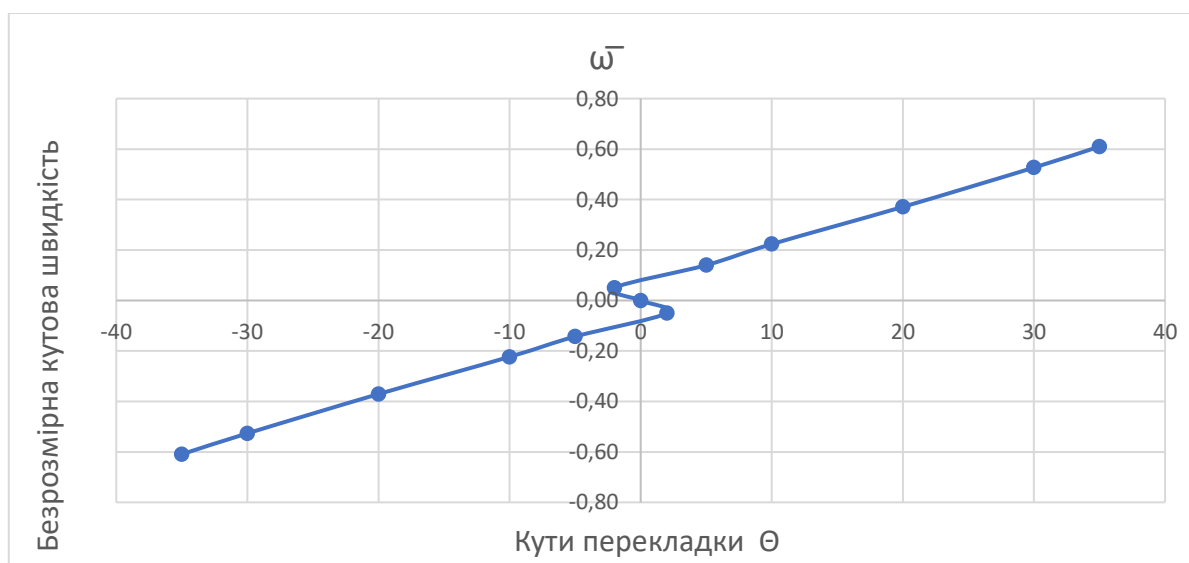


Рисунок 1. Діаграма керованості автономного судна «Yara birkeland» у вантажі на глибокій воді

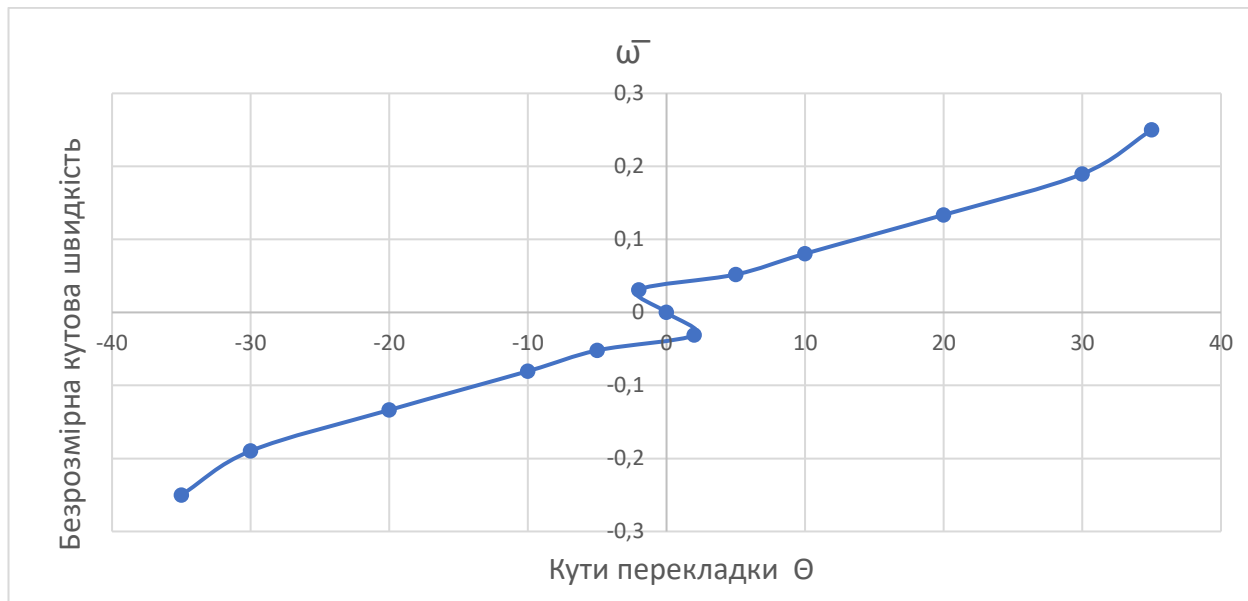


Рисунок 2. Діаграма керованості автономного судна «Yara birkeland» у вантажі на обширному мілководді

Таблиця 4 - Залежність кутової швидкості від кута перекладки на обширному мілководді (Н/Т=1.2)

δ	-35	-30	-20	-10	-5	2	0	-2	5	10	20	30	35
$\bar{\omega}$	0.25	0.19	-0.13	-0.08	-0.05	-0.03	0	0.03	0.05	0.08	0.13	0.19	0.25

Таблиця 5 – Залежність кутової швидкості від кута перекладки на глибокій воді

δ	-35	-30	-20	-10	-5	2	0	-2	5	10	20	30	35
$\bar{\omega}$	0.61	-0.53	-0.37	-0.22	-0.14	-0.05	0	0.05	0.14	0.22	0.37	0.53	0.61

Отримані характеристики поворотності для обширного мілководдя для кута перекладки руля приведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Залежність елементів та параметрів циркуляції т/х «Yara birkeland» у вантажі з ходу для $\delta = 35$ на обширному мілководді.

Н/Т	V_c , уз	ω , $^{\circ}/c$	ap^0	L1,кбт	L2,кбт	Dt,кбт	Dy,кбт
1.2	8.1	0.025	0.53	2.78	2.49	4.56	3.89
1.4	7.2	0.036	0.76	2.32	1.98	4.01	3.4
1.6	6.6	0.05	1.04	1.69	1.71	3.53	2.89
1.8	5.9	0.055	1.13	1.55	1.32	2.98	2.21
2.0	5.1	0.06	1.28	1.42	1.02	2.02	1.93
∞	4.7	0.04	0.95	1.37	0.74	1.65	1.4

Порівняльний графік характеристик кута отримання повороту для обширного мілководдя при Н/Т= 1.1 і глибокої води приведено на рис.3 та рис.4

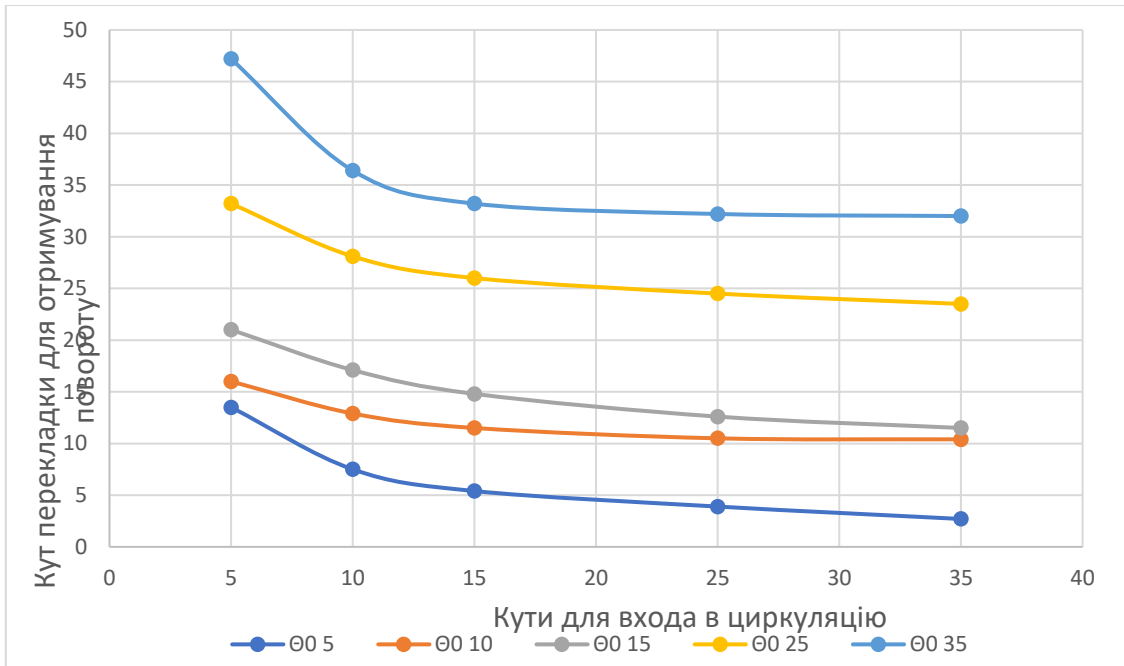


Рисунок 3 Порівняльний графік характеристик кута отримання повороту для обширного мілководдя при $H/T = 1.1$

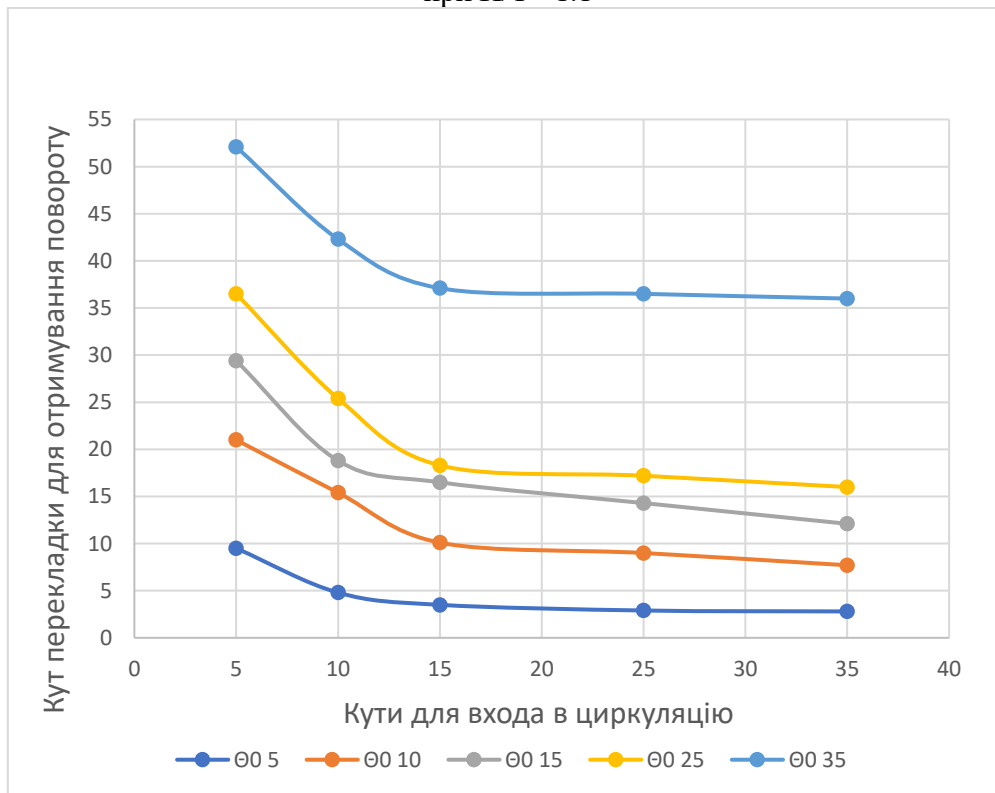


Рисунок 4 Порівняльний графік характеристик кута отримання повороту для глибокої води

При отримуванні малими кутами перекладки руля до значення θ збільшується тільки на 50%. При $\theta \geq 15^\circ$ картина змінюється і значення θ на мілководді менше, ніж на глибокій воді. Це означає, що для отримання доцільно використовувати кути $\delta_{вих}$ не більше 15° . Враховуючи результати імітаційного моделювання можна визнати доцільним створення спеціальних діаграм керованості щодо врахування впливу мілководдя на отримання повороту автономного судна.

Перспективи подальшого розвитку досліджень. В перспективі, для імітаційного отримання повороту необхідно виконати практичну верифікацію використання діаграм керованості для автономного судна на обширному мілководді з урахування запасу води під кілем. Крім того в

подальшому потрібно використання імітаційного моделювання планування руху автономного судна через аварійно-небезпечні ділянки рейсового циклу із використанням сучасних датчиків, комп'ютерних систем та штучного інтелекту.

Подальші наукові роботи повинні бути направлені на удосконалення діаграм керованості з урахуванням навігаційних та кібернетичних ризиків. Вимагає подальшого дослідження впровадження навчання з використанням навігаційного тренажера для підвищення надійності роботи команди берегових автономних систем при роботі на обширному мілководді. Підвищення надійності роботи звичайного та автоматичного суден буде реалізовано за рахунок підвищеної точності визначення впливу мілководдя на точність розрахунку планових координат траєкторними точками маневрування, включаючи криволінійні траєкторії. Це дозволить розглядати їх як віртуальні буї і використовувати системи автоматичної підтримки прийняття рішень та суттєво підвищити оперативність контролю руху судна, за рахунок використання системи динамічного позиціонування.

Висновки. Імітаційне моделювання повороту на обширному мілководді передбачає використання алгоритмів для динамічного врахування факторів, таких як маневрені характеристики судна, вплив погодних умов, розташування перешкод, які можуть порушити роботу автономного судна. Процес адаптації методу розрахунку отримування повороту під час рейсового циклу на обширному мілководді потребує використання сучасних систем моніторингу параметрів навігаційної безпеки, включаючи радіолокатор, гідролокатор та інші датчики параметрів навігаційних морських операцій. Ці інструменти в режимі реального часу відстежують зміну параметрів руху судна та умов навколишнього середовища, таких як рельєф морського дна або поява нових підводних об'єктів та дозволяють своєчасно коригувати курс та швидкість судна, відповідно до їх впливу. Подальші дослідження в цьому напрямі відкривають можливості для розширення використання автономних суден у мілководних регіонах з високою інтенсивністю руху та на обширному мілководді. Таким чином, системний підхід до розрахунку параметрів повороту для автономних суден в районах обширного мілководдя і використання систем підтримки прийняття рішень при маневруванні дозволяє забезпечити допустимий рівень навігаційної безпеки навіть у складних умовах навігаційних і кібернетичних ризиків

Muravyov G., Markitan V., Perevertov D.

INTELLIGENT SYSTEMS FOR PLANNING THE PATH AND CONTROLLING THE MOVEMENT OF AUTONOMOUS VESSELS IN EXTENSIVE SHALLOW WATER IN CASE OF CYBER ATTACKS

The purpose of this study is to determine and validate the parameters of the autonomous vessel model in extensive shallow water by simulating the asymmetric zigzag maneuvering process to determine the impact on its motion parameters. Due to complex hydrodynamic effects in conditions of limited depth, such as reduced under-keel clearance, increased resistance, and changed flow patterns, the course stability changes. Therefore, autonomous navigation systems require high-precision planning to organize trouble-free maneuvering and safe operation of the vessel during cargo transportation. The study solves these problems by simulating the influence of shallow water on the turning parameters and obtaining it in the form of empirical dependencies. This allowed to significantly increase the accuracy of trajectory point planning and made it possible to use decision support systems during maneuvering and use operational methods of motion control by dynamic positioning, taking trajectory points as virtual buoys. In the simulation modeling of the turn, the change in sea depth, initial course and ship speed was used to estimate the delay time of the start of the turn and deviation from the planned trajectory. The simulation demonstrated that with decreasing water depth, the turning radius and tactical diameter of the autonomous ship increase significantly, which significantly affects the course stability and reaction delay. The control system based on the created model was able to adapt the trajectory commands in real time, minimizing deviations from the planned trajectory points. The model accurately captured the asymmetric turn patterns typical of shallow water and improved the predictive capabilities of autonomous navigation algorithms in limited conditions. The results of the performed studies confirm that the inclusion of shallow water dynamics in the decision-making cycle of the autonomous navigation system significantly increases the safety of maneuvering and trajectory accuracy. The developed simulation model, which uses an

asymmetric zigzag, provides a reliable basis for future maneuvering algorithms and real-time traffic control. This framework contributes to safer and more efficient autonomous operation in ports, and also creates conditions for further integration of predictive control on autonomous vessels.

Keywords: *autonomous vessel, shallow water maneuvering, turn modeling, adaptive navigation, subsidence effect, trajectory control, simulated hydrodynamic modeling using the asymmetric zigzag method.*

ЛІТЕРАТУРА

1. Maltsev A.S. (2023) Navigation support for the process of managing the maneuvering of a sea vessel.(Maneuvering booklet)/ Eliva Press - 218 p. <https://www.elivabooks.com/pl/book/book-8240761357>
2. Artyszuk, J. (2016) Peculiarities of zigzag behaviour in linear models of ship yaw motion. Annual of Navigation 26, DOI: 10.1515/aon-2016-0002, pp. 23–38.
3. Nomoto, K. (1960) Analysis of Kempf's standard maneuver test and proposed steering quality indices. In First Symposium on Ship Maneuverability, May 24–25, DTMB Rep. 1461 (AD 442036). Washington: DTMB, pp. 275–304.
4. Aisjah, Aulia. (2010). An Analysis Nomoto Gain and Norbin Parameter on Ship Turning Maneuver. IPTEK The Journal for Technology and Science. 21. 10.12962/j20882033.v21i2.31.
5. Oladosu Emmanuel O., Charles Ugochukwu Orji, Kombo Theophilus-Johnson (2022), DEVELOPMENT OF A MANEUVERING PREDICTION TOOL FORMERCHANT SHIPS, International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, Volume:05/Issue:04/October-2022
6. Yasukawa, H., Yoshimura, Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *J Mar Sci Technol* 20, 37–52 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00773-014-0293-y>
7. Мальцев А.С. (2007) Теорія і практика безпечного управління судном при маневруванні [Дис. докт. техн. наук, Одеська національна морська академія] <https://uacademic.info/ua/document/0507U000538>
8. Maltsev, A., & Surinov, I. (2021). Improving the navigational preparation of a bridge crew for entering/leaving a port, including activities in case of emergency. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(3 (111)), 42–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235092>.
9. Muravyov, G. (2024). Automation of coordinate planning voyage cycle of an autonomous vessel. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 3(5), 120–139. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240305.12>.
10. Johansen, T., Blindheim, S., Torben, T. R., Utne, I. B., Johansen, T. A., & Sørensen, A. J. (2023). Development and testing of a risk-based control system for autonomous ships. Reliability engineering & system safety, 234, 109195, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109195>.
11. de Vos, Jiri & Hekkenberg, Robert & Valdez Banda, Osiris. (2021). The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis. Reliability Engineering & System Safety. 210. 107558. 10.1016/j.ress.2021.107558.
12. IMO. Generic Guidelines for Developing IMO Goal-Based Standards. MSC.1/Circ.1394/Rev.2. 2019. Available online: <https://imorules.com/GUID-CEEB55CC-E9D9-4CFB-B515-6B767644BA62.html> (accessed on 11 November 2022).
13. International Maritime Organization (IMO). Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process (MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2); IMO: London, UK, 2018; Available online: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MSC-MEPC.2-Circ.12-Rev.2%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20\(Fsa\)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20\(Secretariat\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MSC-MEPC.2-Circ.12-Rev.2%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20(Fsa)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20(Secretariat).pdf) (accessed on 22 June 2025).
14. Valdez Banda, Osiris & Goerlandt, Floris. (2018). A STAMP-based approach for designing maritime safety management systems. Safety Science. 109. 10.1016/j.ssci.2018.05.003.
15. Miller, Anna & Rybczak, Monika & Rak, Andrzej. (2021). Towards the Autonomy: Control Systems for the Ship in Confined and Open Waters. Sensors. 21. 2286. 10.3390/s21072286.

REFERENCES

1. Maltsev A.S. (2023) Navigation support for the process of managing the maneuvering of a sea vessel.(Maneuvering booklet)/ Eliva Press - 218 p. <https://www.elivabooks.com/pl/book/book-8240761357>
2. Artyszuk, J. (2016) Peculiarities of zigzag behaviour in linear models of ship yaw motion. *Annual of Navigation* 26, DOI: 10.1515/aon-2016-0002, pp. 23–38.
3. Nomoto, K. (1960) Analysis of Kempf's standard maneuver test and proposed steering quality indices. In *First Symposium on Ship Maneuverability*, May 24–25, DTMB Rep. 1461 (AD 442036). Washington: DTMB, pp. 275–304.
4. Aisjah, Aulia. (2010). An Analysis Nomoto Gain and Norbin Parameter on Ship Turning Maneuver. *IPTeK The Journal for Technology and Science*. 21. 10.12962/j20882033.v21i2.31.
5. Oladosu Emmanuel O., Charles Ugochukwu Orji, Kombo Theophilus-Johnson (2022), DEVELOPMENT OF A MANEUVERING PREDICTION TOOL FORMERCHANT SHIPS, *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, Volume:05/Issue:04/October-2022
6. Yasukawa, H., Yoshimura, Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *J Mar Sci Technol* 20, 37–52 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00773-014-0293-y>
7. Maltsev A.S. (2007) Teoriia i praktyka bezpechnoho upravlinnia sudnom pry manevruvanni [Dys. dokt. tekhn. nauk, Odeska natsionalna morska akademiia] <https://uacademic.info/ua/document/0507U000538>
8. Maltsev, A., & Surinov, I. (2021). Improving the navigational preparation of a bridge crew for entering/leaving a port, including activities in case of emergency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3 (111)), 42–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235092>.
9. Muravyov, G. (2024). Automation of coordinate planning voyage cycle of an autonomous vessel. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 3(5), 120–139. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240305.12>.
10. Johansen, T., Blindheim, S., Torben, T. R., Utne, I. B., Johansen, T. A., & Sørensen, A. J. (2023). Development and testing of a risk-based control system for autonomous ships. *Reliability engineering & system safety*, 234, 109195, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109195>.
11. de Vos, Jiri & Hekkenberg, Robert & Valdez Banda, Osiris. (2021). The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 210. 107558. 10.1016/j.ress.2021.107558.
12. IMO. Generic Guidelines for Developing IMO Goal-Based Standards. MSC.1/Circ.1394/Rev.2. 2019. Available online: <https://imorules.com/GUID-CEEB55CC-E9D9-4CFB-B515-6B767644BA62.html> (accessed on 11 November 2022).
13. International Maritime Organization (IMO). Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process (MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2); IMO: London, UK, 2018; Available online: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MSC-MEPC.2-Circ.12-Rev.2%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20\(Fsa\)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20\(Secretariat\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MSC-MEPC.2-Circ.12-Rev.2%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20(Fsa)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20(Secretariat).pdf) (accessed on 22 June 2025).
14. Valdez Banda, Osiris & Goerlandt, Floris. (2018). A STAMP-based approach for designing maritime safety management systems. *Safety Science*. 109. 10.1016/j.ssci.2018.05.003.
15. Miller, Anna & Rybczak, Monika & Rak, Andrzej. (2021). Towards the Autonomy: Control Systems for the Ship in Confined and Open Waters. *Sensors*. 21. 2286. 10.3390/s21072286.

Стаття прийнята 20.10.2025