

СУЧАСНІ МЕТОДИ ЗАПОБІГАННЯ ЗІТКНЕННЯ СУДЕН ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В УПРАВЛІННІ АВТОНОМНИМИ СУДНАМИ

Бень А. П., к.т.н., професор, проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: a_ben@i.ua, ORCID: 0000-0002-9029-3489;

Пелихівський Л. О., аспірант Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: leonid.pelykhivskiy@gmail.com, ORCID: 0009-0004-1226-3091;

Соловей О. С., к.т.н., доцент кафедри управління судном Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: oleksandr_79@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2605-6788.

Стаття присвячена питанням застосування методів запобігання зіткнень суден у процесах управління безекіпажними автономними суднами (БАС). Окреслено коло важливих питань сучасного стану розвитку індустрії автономних та безекіпажних суден. Проведено порівняльний аналіз наявних методів запобігання зіткнення суден. Визначено недоліки та переваги кожного методу, а також особливості їх практичного застосування при управлінні БАС. Наведено структуру та зазначено відмінні риси процесу управління рухом автономних та безекіпажних суден у порівнянні із суднами, якими здійснює управління судноводій. З'ясовано особливості процесу управління БАС та визначено коло методів, які мають бути застосовані для його реалізації. Розглянуто методи управління БАС та запропонована архітектура системи управління, що базується на комбінованому використанні методів нечіткої логіки, прогнозного керування та пояснюваного штучного інтелекту. Доведено, що поєднання різних методів обробки навігаційної інформації та прийняття рішень, дозволяє забезпечити якісне управління рухом БАС у режимі реального часу, за умов наявності похибок та неповноти навігаційних даних. Визначено шляхи практичної реалізації запропонованої архітектури системи управління БАС та перспективні напрямки подальших наукових досліджень у зазначеному напрямку.

Ключові слова: судноводіння; методи уникнення зіткнень; системи керування; управління судном; безекіпажні судна; автономні судна; штучний інтелект; безпека мореплавства.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.145-156

Вступ. У сучасних умовах глобальної трансформації морської галузі, пов'язаної з цифровізацією, автоматизацією та підвищенням вимог до безпеки судноплавства, ефективності та екологічності морських перевезень, дедалі більшого значення набуває застосування безекіпажних автономних суден (БАС, автономне судно). Зазначені судна здатні функціонувати без постійної участі людини, що відкриває нові можливості для виконання завдань у віддалених або небезпечних зонах, зменшує вплив людського фактора на процеси навігації та знижує експлуатаційні витрати. У поєднанні із розвитком штучного інтелекту (ШІ), системами дистанційного моніторингу стану та технологіями супутникової навігації, застосування БАС дозволяє істотно підвищити ефективність морських перевезень, а також рівень безпеки на водних шляхах.

Важливість індустрії автономних та безекіпажних суден вже визнана і на міжнародному рівні. Так, починаючи з 2017 року, Міжнародна морська організація (ІМО) активно досліджує правовий статус та експлуатаційні аспекти БАС у межах нормативного аналізу (Regulatory Scoping Exercise) щодо застосування наявних конвенцій до автономного судноплавства. У 2021 році ІМО визначила чотири рівні автономності (від дистанційного управління до повністю автономного режиму) та заклала основу для майбутнього правового регулювання практичного застосування БАС [1].

Крім того, ІМО визнає, що наявні міжнародні нормативно-правові документи, зокрема Міжнародні правила запобігання зіткненням суден у морі COLREG 72, а також конвенції SOLAS, MARPOL та STCW, потребують адаптації для врахування специфіки експлуатації БАС [2]. На сучасному етапі формуються рекомендації для інтеграції таких суден у наявну інфраструктуру, з дотриманням принципів безпеки, охорони навколишнього середовища та відповідальності судновласників.

Особливої значущості на поточний момент часу набуває використання БАС у сфері вантажних перевезень, океанографічних досліджень, екологічного моніторингу та реагування на надзвичайні ситуації.

Водночас слід зазначити, що розвиток галузі БАС ставить перед науковцями і низку складних викликів, зокрема в частині забезпечення їх автономності, здатності до прийняття рішень у реальному часі та інтеграції в наявну морську інфраструктуру. Саме тому дослідження наявних методів управління БАС, їх подальший розвиток та вдосконалення є важливою науково практичною задачею сьогодення.

Актуальність досліджень. Дослідження методів керування БАС обґрунтовано привертають інтерес дослідників по всьому світу [3–5], що обумовлено кількома обставинами. По-перше, світова морська індустрія дедалі активніше впроваджує інтелектуальні системи управління для підвищення ефективності, зниження витрат та мінімізації впливу людського фактора, який досі є однією з основних причин морських інцидентів. По-друге, стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту, сенсорики, комп'ютерного зору та цифрових комунікацій створює передумови для появи нових класів суден, здатних самостійно приймати рішення та адаптуватися до змінних умов зовнішнього середовища.

Зазначена тематика також набуває важливого значення в контексті забезпечення безпеки навігації в умовах обмеженої видимості, високої щільності руху або нестандартних ситуацій, де класичні автоматизовані системи можуть виявитись недостатньо гнучкими. Крім того, сучасне міжнародне право й регуляторна база вимагають від розробників автономних суден гарантування передбачуваної поведінки та високої надійності систем керування, що потребує нових підходів до моделювання, верифікації та тестування таких систем. Дослідження методів управління БАС є важливою складовою для формування стандартів, практик і технологічних рішень, що будуть забезпечувати безпечну інтеграцію автономних платформ у глобальну морську транспортну систему [6, 7].

Враховуючи вищенаведені обставини, особливої уваги потребує дослідження методів управління БАС при вирішенні задач маневрування та уникнення зіткнень, а також визначення шляхів їх подальшої практичної реалізації, що й обумовило вибір мети та основних задач дослідження.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу наявних методів запобігання зіткнень суден та визначення особливостей їх подальшого практичного застосування у вирішенні задач управління рухом автономними та безекіпажними суднами.

Об'єкт дослідження: процес управління рухом автономного судна.

Предмет дослідження: методи уникнення зіткнень та управління рухом автономних та безекіпажних суден.

Досягнення поставленої мети дослідження передбачає вирішення наступних задач:

1. Провести порівняльний аналіз наявних методів запобігання зіткнень морських суден, визначити їх найбільш істотні переваги, недоліки та особливості практичного застосування.

2. Визначити структуру та відмінні риси процесу управління рухом автономних та безекіпажних суден у порівнянні із суднами, якими здійснює управління судноводій.

3. Визначити методи, які мають бути застосовані для здійснення ефективного та безпечного управління рухом безекіпажних суден.

4. Розробити архітектуру системи управління автономним судном та визначити шляхи її подальшої практичної реалізації.

Основна частина. Під поняттям «запобігання зіткнень» у судноводінні визначають процес, в якому власне судно (автономне, або кероване судноводієм) відхиляється від запланованої траєкторії руху з метою запобігання потенційного небажаного фізичного контакту з іншим судном або навігаційною перешкодою [7]. Виходячи із вищезазначеного, можна зробити висновок, що вирішення проблеми уникнення зіткнень суден полягає у

необхідності одночасного вирішення двох взаємопов'язаних задач: ідентифікації навігаційних небезпек та прийняття рішень з управління рухом судна, спрямованих на уникнення можливих зіткнень.

Розглядаючи процеси управління рухом екіпажного та автономного судна (рис. 1), необхідно звернути увагу на певні відмінні риси, які надалі мають істотний вплив на вибір найбільш ефективних методів управління.

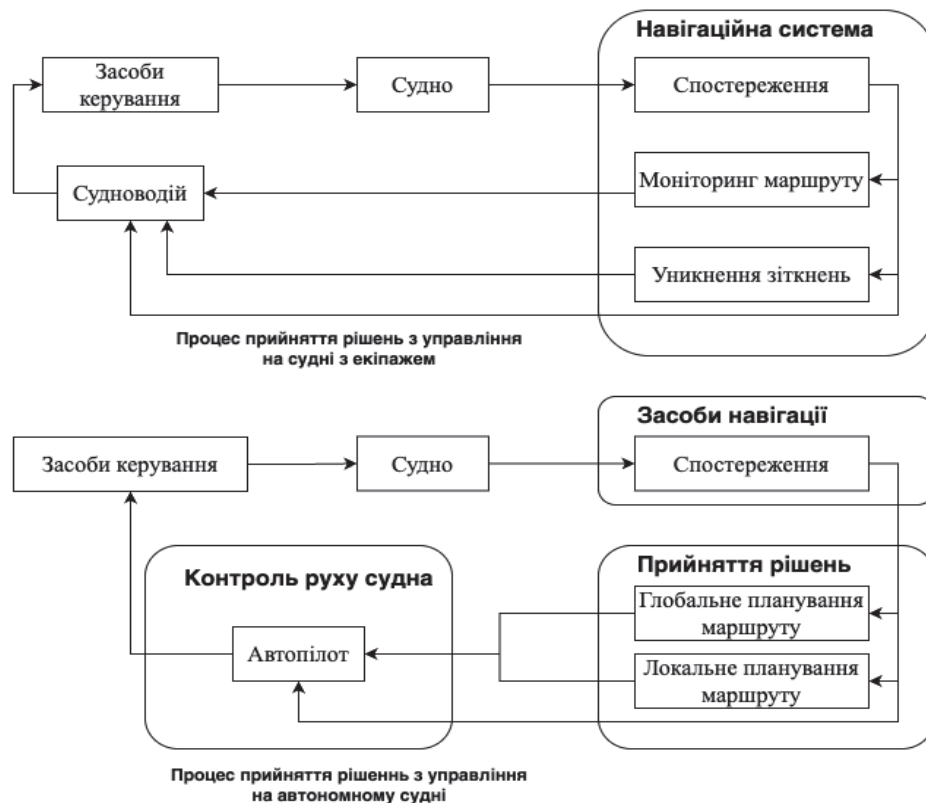


Рисунок 1 – Процеси управління рухом екіпажного та автономного судна

Так, для управління рухом екіпажного судна, застосовується інтегрована навігаційно-інформаційна система ходового містка, призначена для уникнення зіткнень переважно на етапі ідентифікації небезпек, і як наслідок, ключова роль у процесі прийняття рішень з управління судном покладається безпосередньо на судноводія.

Для автономного судна процес управління є повністю автоматизованим і здійснюється єдиною навігаційно-керуючою системою, в якій одночасно функціонує кілька контурів управління рухом, як на оперативному, так і на загальному (стратегічному) рівні.

Беручи до уваги наведену на рис. 1 структуру процесу управління рухом автономного судна, можна визначити його ключові особливості, а саме:

- необхідність забезпечення належного рівня швидкодії окремих модулів та виконавчих пристроїв системи керування для забезпечення постійного управління його рухом у режимі реального часу;

- наявність факторів неповноти та неточності вхідних навігаційних даних, які істотним чином залежать від кількості, поточного технічного стану та умов функціонування бортових навігаційних приладів та засобів зв'язку;

- високий рівень відповідальності стосовно вірності та своєчасності прийнятих рішень, у зв'язку із відсутністю людини-оператора (судноводія) як корегуючої ланки в процесі управління рухом судна;

- потреба забезпечення високого рівня надійності функціонування та збереження (хоча б і в обмеженому функціоналі) можливостей управління рухом автономного судна у випадках технічної відмови окремих навігаційних та виконавчих пристроїв або каналів зв'язку.

Слід зазначити, що розв'язання проблеми уникнення зіткнень, як екіпажних, так і автономних суден, привертає інтерес багатьох дослідників з усього світу і характеризується різноманітністю математичних моделей, методів, апаратних та програмних засобів, що застосовуються у процесі її вирішення.

Так, у роботі [7] описано застосування методів уникнення зіткнень суден із застосуванням правил COLREG 72 у поєднанні з математичними моделями на основі нечіткої логіки та мереж Байєса. Система застосовує сценарний підхід у процесі формування рішень, якій дозволяє додатково враховувати принципи «доброї морської практики». Недоліком системи є те, що база сценаріїв щодо можливих дій не є вичерпною, що не гарантує отримання необхідного рішення з управління судном для будь-якої навігаційної ситуації.

Роботи [8, 9] присвячено питанням застосування методів уникнення зіткнень на основі віртуальних векторів руху суден цілей. Так, у дослідженні [8], описано алгоритм методу штучного поля потенціалів (Artificial Potential Field, APF), згідно з яким формується поле потенціалів, в якому наявні відштовхувальні потенціали навколо перешкод руху судна, і, навпаки, потенціал, що притягує – у кінцевій точці маршруту. Сума потенціалів у різних точках визначає результуючу віртуальну силу, яка керує рухом судна. Ранні версії алгоритму не забезпечували уникнення зіткнень та не були пристосовані до навігаційних ситуацій, що зазнають динамічних змін, а лише вказували рекомендований напрямок руху. З метою можливості уникнення зіткнень у динамічному середовищі, дослідники вдосконалили базовий алгоритм, враховуючи два фактори: швидкість руху перешкод і максимальне гальмування судна. У роботі [9] досліджено метод обмеженого циклу (Limited Cycle Method, LCM), який використовує для планування руху судна в умовах бурхливого моря еліпсоподібні траєкторії. Обидва методи, APF і LCM, зазвичай ігнорують під час планування руху динаміку судна. Слід зазначити, що метод APF може в процесі пошуку рішень «застрягти в локальному мінімумі», а метод LCM розглядає лише одну перешкоду або одну групу перешкод за одну ітерацію, за умов, що перешкоди повинні бути статичними або мати низьку швидкість. Проте виявлено, що цей метод ефективно працює зі статичними перешкодами в умовах бурхливого моря [10]. Також методи APF і LCM формують лише одне рішення, яке не обов'язково є оптимальним.

Методи дискретного керування рухом судна у просторі рішень, які розглянуто у публікаціях [10–14], ґрунтуються на послідовній перевірці кожної потенційної траєкторії руху на можливість зіткнення, після чого з усіх безпечних варіантів обирається найкращий. Зазначені методи передбачають, що модель руху судна заздалегідь відома, а фактори впливу зовнішнього середовища тимчасово ігноруються. До вказаної групи належать методи: диску рішень (Decision Disc, DD), динамічного вікна (Dynamic Window, DW), дискретної оптимізації (Discrete Inputs Optimization, DIO), пошуку на основі решіток (Lattice-based Search, LBS) та повного перебору (Brute-force Search, BFS).

Згідно з методом DD здійснюється постійна перевірка безпеки траєкторії руху за умов незмінності керуючих дій. Метод DW використовує в якості вихідних даних лінійну та кутову швидкості судна, далі враховуються фізичні обмеження на рух судна, і простір пошуку рішень (діапазони швидкостей) звужується шляхом збереження лише тих пар швидкостей, які гарантують, що судно може зупинитися до зіткнення з перешкодою. Збережені пари швидкостей формують динамічне вікно, в якому і здійснюється вибір остаточного рішення з керування. Істотним недоліком методу є його сприйнятливість до знаходження локальних мінімумів.

Метод дискретної оптимізації DIO базується на застосуванні цільових функцій траєкторій руху, які мають більш високі значення, якщо траєкторії руху проходять ближче до навігаційних перешкод. Відповідно, мінімізація таких функцій дозволяє обрати більш безпечні маршрути судна.

Метод пошуку на основі решіток LBS будує граф з усіх можливих керувань на кожному кроці, що дозволяє забезпечити високу точність та надійність керування. Але цей

метод є вельми затратним із точки обсягів обчислень та, відповідно, часу, необхідного для виконання розрахунків. Метод повного перебору BFS здійснює порівняльну оцінку усіх можливих варіантів керувань, однак через високу складність також потребує введення спрощень опису навігаційних ситуацій. Зважаючи на високу ресурсомісткість, два останні методи можуть бути застосовані на практиці лише за умов введення певних додаткових обмежень щодо вихідних даних та областей пошуку рішень.

У роботах [15–18] розглянуто методи пошуку рішень з управління рухом судна у неперервному просторі керувань, які спрямовані на знаходження безпечних (без можливих зіткнень) траєкторій. До вказаної групи методів слід віднести наступні: метод пошуку швидкісних перешкод (Velocity Obstacle, VO) та його модифікації (Nonlinear Velocity Obstacle, NVO) та (Generalized Velocity Obstacle, GVO), а також метод конусів огляду (Vision Cone, VC) та прогнозного керування (Model Predictive Control, MPC).

Згідно з методами VO, NVO та GVO відбувається визначення небезпечних зон руху залежно від швидкостей та напрямків руху суден цілей, далі обирається траєкторія руху власного судна, яка оминає небезпечні ділянки. До недоліків зазначених методів слід віднести наявність припущень стосовно сталості швидкостей суден цілей, неврахування (повне або часткове) обмежень руху власного судна та суден цілей, а також фіксована форма опису небезпечної ділянки, яка вважається опуклою (коло, еліпс тощо).

Метод VC передбачає введення обмежень на область руху власного судна у вигляді конуса (конуса безпеки руху). Недоліком методу є те, що він не надає можливості враховувати рух кількох суден цілей одночасно і передбачає, що швидкість власного судна є більшою за швидкість судна цілі.

Метод MPC дозволяє обрати безпечну траєкторію руху судна у дискретному часі з урахуванням динамічних обмежень. Недоліком методу є його чутливість до знаходження локальних мінімумів цільової функції і необхідності проведення верифікації отриманих рішень.

У роботах [19, 20] розглянуто методи формування безпечної траєкторії руху суден на основі перепланування маршруту. Процес перепланування траєкторії руху починається з того моменту часу, коли ризик можливого зіткнення перевищує певний поріг. Методи перепланування можна поділяти на дві групи: ті, які застосовують методи пошуку з використанням графів (Graph Search, GS), та інші. У першому випадку формується «карта вартостей», згідно з якою зона навколо перешкод має високу «ціну», а потім здійснюється пошук найменш витратного шляху за допомогою допоміжних методів, таких, як метод швидкого розповсюдження, відпалу або оптимізації рою часток.

Інша група застосовує еволюційні алгоритми, які не вимагають побудови графу. Це, зокрема, алгоритм мурашиної колонії, генетичні алгоритми та еволюційні методи пошуку рішень (Evolutionary algorithm, EA). Перевагою методів перепланування маршруту є універсальність та гнучкість застосування, проте їх істотним недоліком є висока обчислювальна складність.

Наявні переваги та недоліки кожної з вищевказаних груп методів спонукають дослідників до одночасного застосування для вирішення проблеми уникнення зіткнень кількох методів із різних груп. Так, у роботі [21] автори використали алгоритм множини швидкісних перешкод разом із правилами COLREG 72 для виключення швидкостей, які призводять до зіткнень або порушують правила руху суден. У дослідженні [8] використано метод, заснований на правилах у поєднанні з методом штучного потенційного поля для керування БАС.

Таким чином, проведений ґрунтовний аналіз низки робіт із зазначеної тематики [6–21], дозволив виділити наступні ключові групи методів, які можуть бути використані для вирішення проблеми уникнення зіткнень.

1. Методи на основі правил, що передбачають застосування продукційних правил логічного висновку типу “якщо-то” для прийняття рішень з управління рухом суден з метою уникнення зіткнень.

2. Методи, які засновані на формуванні віртуального векторного поля руху суден, що дозволяє оцінити наявну навігаційну ситуацію в цілому та вибрати найбільш безпечну траєкторію.

3. Методи дискретного управління рухом судна та пошуку рішень у дискретному просторі керуючих впливів, залежно від навігаційної ситуації, що має місце.

4. Методи адаптивного неперервного управління судном з урахуванням наявних обмежень його руху.

5. Методи перепланування траєкторій руху судна.

6. Гібридні методи, які є за своєю сутністю поєднанням двох або більше з вищезазначених методів із метою більш ефективного та якісного пошуку рішень.

Серед математичних моделей, які використовуються для опису рух суден цілей та власного судна застосовуються кінематичні [10], динамічні [13, 14] та геометричні [15] моделі.

Підсумки проведеного аналізу математичних моделей та методів, що застосовуються для вирішення питань уникнення зіткнень, наведено у таблиці 1, у якій зазначено ключові характеристики кожного методу, його переваги та недоліки, а також особливості практичного застосування.

Таблиця 1 – Порівняння наявних методів запобігання зіткнень суден

№	Назва методу	Скорочена абревіатура назви методу	Модель руху судна	Кількість суден цілей	Результат розв'язку (дії з управління рухом)	Гарантована Оптимальність управління	Опис (особливості практичного застосування, переваги та недоліки), джерело
1	Логічні правила	Single-rule	—	Одне	Маневр судна	Ні	Простий з точки зору практичної реалізації, але має певні обмеження у застосуванні (лише відкрите море) [6]
2		Multiple-rule	—	Одне	Маневр судна (швидкість, курс)	Ні	Простий з точки зору практичної реалізації, не забезпечує можливість врахування усіх можливих сценаріїв керувань [7]
3	Віртуальні вектори руху	APF	—	Кілька	Маневр судна (курс)	Ні	Простий з точки зору практичної реалізації. Схильний до потрапляння в локальний мінімум. Непридатний для керування в навігаційних ситуаціях, що динамічно змінюються [8]
4		LCM	—	Одне	Траєкторія руху	Ні	Простий з точки зору практичної реалізації. Аналізує рух лише однієї швидкісної перешкоди. Непридатний для керування в навігаційних ситуаціях, що динамічно змінюються [9]
5	Дискретне управління рухом	DW	Кінематична/ Динамічна	Кілька	Маневр судна (швидкість, кутова швидкість)	Так	Має широкий спектр застосувань, здатний формувати альтернативні рішення. Непридатний для керування в навігаційних ситуаціях, що динамічно змінюються. Припинення розрахунків може призвести до зіткнення [10]

Продовження таблиці 1

6		DD	Геометрична	Кілька	Маневр судна (швидкість, курс)	Так	Пропонує альтернативні рішення, але не враховує динаміку судна [11]
7		DIO	Геометрична/Динамічна	Кілька	Траєкторія, керуючі дії	Так	Пропонує альтернативні рішення, складний із точки зору практичної реалізації [12]
8		LBS	Динамічна	Кілька	Траєкторія, керуючі дії	Так	Точний, але має високу ресурсомісткість і тривалий час пошуку рішень [13]
9		BFS	Динамічна	Кілька	Траєкторія, керуючі дії	Ні	Точний, але має високу ресурсомісткість і тривалий час пошуку рішень [14]
10		VO	Геометрична	Кілька	Маневр судна	Так	Простий, ефективний у застосуванні. Пропонує альтернативні рішення, але не враховує динаміку судна [15]
11		GVO	Динамічна	Кілька	Траєкторія, керуючі дії	Так	Враховує динамічні обмеження та формує альтернативні рішення, проте має певні похибки внаслідок застосування лінеаризації [16]
12	Постійне адаптивне управління рухом	VC	Динамічна	Одне	Траєкторія, керуючі дії	Так	Простий і ефективний, але має обмеження щодо застосування (уникнення зіткнень лише з однією перешкодою, що має швидкість, менше ніж власне судно) [17]
13		MPC-SA	Динамічна	Кілька	Траєкторія, керуючі дії	Так	Дозволяє враховувати динамічні обмеження. Чутливий до знаходження локальних мінімумів цільової функції, є необхідність проведення верифікації рішень, які отримані [18]
14	Пере-планування маршруту	GS	–	Кілька	Траєкторія руху	Так	Універсальність застосування, висока ресурсомісткість та обчислювальна складність [19]
15		EA	–	Кілька	Траєкторія руху	Так	Універсальність застосування, висока ресурсомісткість та обчислювальна складність [20]

Розглядаючи наведені методи уникнення зіткнень із позицій їх подальшого застосування у БАС, та беручи до уваги структуру процесу управління рухом автономного судна (рис. 1) і його особливості, можна дійти до висновку, що для різних контурів обробки інформації з управління БАС, необхідно застосовувати різні методи управління. Так, на стратегічному рівні керування БАС, доцільно застосовувати методи перепланування маршруту та дискретного управління рухом, тоді як на рівні оперативного управління слід застосовувати поєднання методів логічних правил та віртуальних векторів руху.

Також, відповідно до задач дослідження, було визначено коло методів управління судновими системами, які доцільно застосовувати в БАС. Методи управління судновими

системами та пристроями можуть бути розподілені на шість основних груп: класичні PID-регулятори, адаптивні, робастні, нечіткої логіки, моделі прогнозованого керування та методи ІІІ. Кожна група методів має свої переваги та недоліки залежно від умов практичного застосування, а також вимог до точності та наявних обчислювальних ресурсів [5].

1. Класичні PID-регулятори – найпростіші та найбільш поширені методи керування в умовах наявності незначних зовнішніх впливів.

2. Адаптивні методи, дозволяють автоматично змінювати параметри залежно від зміни характеристик системи керування або зовнішніх умов.

3. Робастні методи (H_∞ -керування) забезпечують високу стійкість до невизначеності та неповноти вихідних даних, проте мають високу обчислювальну складність, що утруднює їх практичне застосування для здійснення управління судном у режимі реального часу.

4. Методи нечіткої логіки ефективні для моделювання складних систем без точного математичного опису, зокрема при маневруванні в умовах обмеженої видимості або при уникненні зіткнень.

5. Моделі прогнозованого керування забезпечують високу точність руху при складних траєкторіях, але вимагають значних обчислювальних ресурсів, що обмежує їх використання.

6. Методи ІІІ та гібридні методи керування. Дозволяють поєднати ефективність точного контролю з гнучкістю практичного застосування, але є також доволі вибагливими до задіяних апаратних і програмних ресурсів.

Гібридні підходи є найбільш перспективними для майбутніх систем автономного судноплавства, оскільки дозволяють поєднувати сильні сторони кількох методів керування високу точність, адаптивність до змін середовища та стійкість до зовнішніх збурень. Інтеграція засобів ІІІ [22, 23] у системи керування дозволяє істотно підвищити якість та надійність таких процесів для БАС. Вищезазначене особливо актуальне у випадках наявності збурень зовнішнього середовища, маневрування суден в обмеженому просторі, неповноті навігаційних даних, за умов обмежень часу на прийняття рішень та критичних ситуаціях.

У результаті проведеного дослідження сучасних методів керування встановлено, що жоден із класичних підходів – PID-регулювання або методи оптимального (робастного) керування не здатні повною мірою задовольнити вимоги до адаптивності, стійкості та пояснюваності рішень в умовах динамічних навігаційних ситуацій та наявності зовнішніх впливів. Методи побудовані на нечіткій логіці, машинному навчанні або МРС, мають окремі сильні сторони, але водночас обмежені при застосуванні у реальних сценаріях через складність налаштування, чутливість до зміни параметрів зовнішнього середовища або недостатню прозорість дій.

Виходячи з вищенаведеного, вбачаємо доцільним застосування багаторівневої архітектури системи керування БАС, що передбачає застосування декількох методів, таких як: нечітка логіка, моделі прогнозованого керування та пояснюваний ІІІ. З урахуванням вищезазначеного, була розроблена архітектура системи керування БАС, яка наведена на рис. 2.

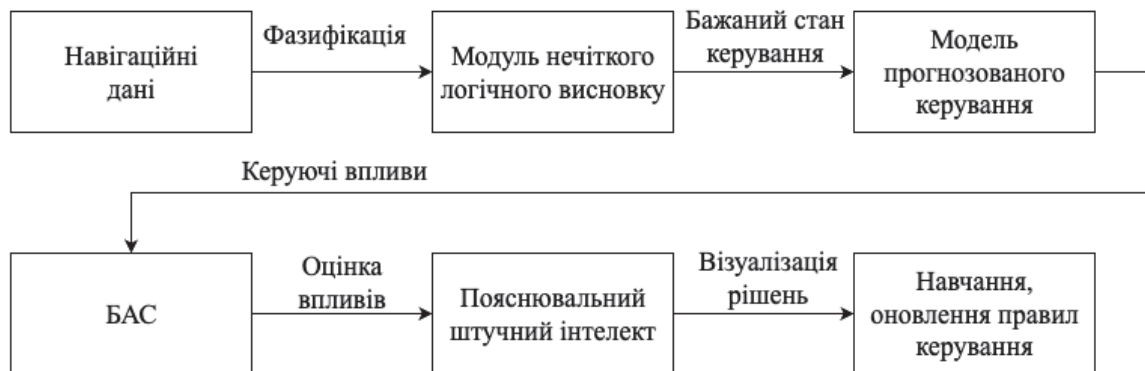


Рисунок 2 – Архітектура системи управління рухом БАС

Процес обробки навігаційних даних та управління БАС згідно з представленою архітектурою здійснюється наступним чином. На початковому етапі виконується попередня обробка навігаційних даних та переведення їх до формату, придатному до обробки у модулі нечіткого логічного висновку. Далі визначаються необхідні керування рухом БАС на основі наявного відхилення від планованого маршруту, оцінки наявних навігаційних ризиків (перешкоди, вітер, течії) та бажаної майбутньої позиції БАС. Модель прогнозованого керування розв'язує оптимізаційну задачу управління рухом БАС, використовуючи поточний курс та швидкість як базову траєкторію та враховує наявні параметри стану та обмеження руху: позиція, швидкість, прискорення, кутова швидкість, припустимі діапазони змін параметрів керування. Отриманий результат надходить до технічних засобів управління БАС та здійснює зміни траєкторії руху БАС, після чого система управління оцінює успішність здійсненого керування (точність дотримання заданої траєкторії руху за умов не перевищення завданого порогу ризику зіткнення). Модуль пояснюваного III інтерпретує, які саме нечіткі правила були активовані, і зміна яких саме параметрів руху мала найбільший вплив, та, за потребою, здійснює візуалізацію маневру БАС оператору, якій може дистанційно спостерігати рух БАС. У випадку успішного виконання маневру, відбувається оновлення бази правил системи керування для їх застосування надалі у навігаційних ситуаціях, подібних до поточної.

Висновки. Розглянута структура та виявлені відмінні риси процесу управління рухом автономних та БАС у порівнянні із суднами, якими здійснює управління судноводій, дозволяють зробити висновок стосовно наявності у системах управління такими суднами кількох контурів керування, що, в свою чергу, обумовлює необхідність комбінованого застосування різних методів керування рухом.

Проведений порівняльний аналіз наявних методів запобігання зіткнень морських суден дозволив визначити їх найбільш істотні переваги, недоліки та особливості практичного застосування. Визначена перспективність застосування гібридних методів, які базуються на застосуванні кількох підходів: нечітка логіка, прогнозоване керування, пояснюваний III тощо. Поєднання різних методів обробки навігаційної інформації та прийняття рішень дозволяє забезпечити якісне управління рухом БАС у режимі реального часу за умов наявності похибок та неповноти навігаційних даних.

Перспективним напрямком подальших наукових досліджень є розробка відповідних програмних та апаратних засобів керування БАС, які дозволять реалізувати запропоновану архітектуру системи керування на рівні практичних розробок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. IMO. Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships (MASS) – MSC.1-Circ.1638, London, UK. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MASSRSE2021.aspx>.
2. IMO. Autonomous shipping – International Maritime Organization. MSC.1-Circ.1605, London, UK. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>.
3. A. Q. Ansari, Department of Elect. Engg., Faculty of Engg. and Technology, Jamia Millia Islamia, New Delhi-110025, India. The Basics of Fuzzy Logic: A Tutorial Review. https://www.researchgate.net/publication/278031775_The_Basics_of_Fuzzy_Logic_A_Tutorial_Review.
4. Eriksen B.-O. H., Breivik M., Wilthil E. F., Flåten A. L., Brekke E. F. The branching-course model predictive control algorithm for maritime collision avoidance. J. Field Robotics. 2019;36:1222–1249. <https://doi.org/10.1002/rob.21900>.
5. Yujuan Wang, Chao Shen, Jiahui Huang & Hua Chen Model-free adaptive control for unmanned surface vessels: a literature review. <https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2316170>.

6. Fang M.-C., Tsai K.-Y. & Fang C.-C. A Simplified Simulation Model of Ship Navigation for Safety and Collision Avoidance in Heavy Traffic Areas. *Journal of Navigation*, 71(04), 837–860. <https://doi.org/10.1017/S0373463317000923>.
7. Perera L. P., Carvalho J. P. & Soares C. G. (2012). Intelligent Ocean Navigation and Fuzzy-Bayesian Decision/Action Formulation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(2), 204–219. <https://doi.org/10.1109/Joe.2012.2184949>.
8. Lyu H. & Yin Y. (2018). COLREGS-Constrained Real-time Path Planning for Autonomous Ships Using Modified Artificial Potential Fields. *Journal of Navigation*, 72(3), 588–608. <https://doi.org/10.1017/s0373463318000796>.
9. Mahini F., DiWilliams L., Burke K. & Ashrafiuon H. An experimental setup for autonomous operation of surface vessels in rough seas. *Robotica*, 31(05), 703–715. <https://doi.org/10.1017/S0263574712000720>.
10. Serigstad E. Hybrid Collision Avoidance for Autonomous Surface Vessels. NTNU. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.460>.
11. Szlapczynski R. & Krata P. Determining and visualizing safe motion parameters of a ship navigating in severe weather conditions. *Ocean Engineering*, 158, 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.092>.
12. Li S., Liu J., Cao X. & Zhang Y. A Novel Method for Solving Collision Avoidance Problem in Multiple Ships Encounter Situations. 11184, 47–66. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00898-7_4.
13. Shah B. C., Švec P., Bertaska I. R., Sinisterra A. J., Klinger W., von Ellenrieder K., Gupta S. K. Resolution-adaptive risk-aware trajectory planning for surface vehicles operating in congested civilian traffic. *Autonomous Robots*, 40(7), 1139–1163. <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9529-x>.
14. Zhang W. B., Goerlandt F., Montewka J. & Kujala P. A method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. *Ocean Engineering*, 107, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.046>.
15. Zhuang J. Y., Zhang L., Zhao S. Q., Cao J., Wang B. & Sun H. B. Radar-based collision avoidance for unmanned surface vehicles. *China Ocean Engineering*, 30(6), 867–883. <https://doi.org/10.1007/s13344-016-0056-0>.
16. Chen P., Huang Y., Mou J. & van Gelder P. H. A. J. M. Ship collision candidate detection method: A velocity obstacle approach. *Ocean Engineering*, 170, 186–198. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.023>.
17. Wiig M. S., Pettersen K. Y. & Savkin A. V. A Reactive Collision Avoidance Algorithm for Nonholonomic Vehicles. 2017 Ieee Conference on Control Technology and Applications (Ccta 2017), 1776–1783. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.345>.
18. Abdelaal M., Franzle M. & Hahn A. Nonlinear Model Predictive Control for trajectory tracking and collision avoidance of underactuated vessels with disturbances. *Ocean Engineering*, 160, 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.026>.
19. Lazarowska A. A new deterministic approach in a decision support system for ship's trajectory planning. *Expert Systems with Applications*, 71, 469–478. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.11.005>.
20. Lazarowska A. Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation. *Journal of Navigation*, 68(02), 291–307. <https://doi.org/10.1017/s0373463314000708>.
21. Kuwata Y., Wolf M. T., Zarzhitsky D. & Huntsberger T. L. Safe Maritime Autonomous Navigation With COLREGS, Using Velocity Obstacles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), 110–119. <https://doi.org/10.1109/Joe.2013.2254214>.
22. Saurav Sarkar, Soma Das, Ananya Chanda, Sayan Biswas, Classify Chronic Wounds, Explainable and Responsible Artificial Intelligence in Healthcare, <https://doi.org/10.1002/9781394302444.ch12>, (297–322), (2025).

23. Angelov P. P., Soares E. A., Jiang R., Arnold N. I. & Atkinson P. M. Explainable artificial intelligence: an analytical review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 11(5), e1424. <https://doi.org/10.1002/widm.1424>.

REFERENCES

1. IMO. (2021). Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships (MASS) – MSC.1-Circ.1638, London, UK. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MASSRSE2021.aspx>.
2. IMO. (2019) Autonomous shipping – International Maritime Organization. MSC.1-Circ.1605, London, UK. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>.
3. A. Q. Ansari, Department of Elect. Engg., Faculty of Engg. and Technology, Jamia Millia Islamia, New Delhi-110025, India. The Basics of Fuzzy Logic: A Tutorial Review. https://www.researchgate.net/publication/278031775_The_Basics_of_Fuzzy_Logic_A_Tutorial_Review.
4. Eriksen, B.-O. H., Breivik, M., Wilthil, E. F., Flåten, A. L., Brekke, E. F. (2019). The branching-course model predictive control algorithm for maritime collision avoidance. *J. Field Robotics*. 2019;36:1222–1249. <https://doi.org/10.1002/rob.21900>.
5. Yujuan Wang, Chao Shen, Jiahui Huang & Hua Chen (2024). Model-free adaptive control for unmanned surface vessels: a literature review. <https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2316170>.
6. Fang, M.-C., Tsai, K.-Y., & Fang, C.-C. (2017). A Simplified Simulation Model of Ship Navigation for Safety and Collision Avoidance in Heavy Traffic Areas. *Journal of Navigation*, 71(04), 837–860. <https://doi.org/10.1017/S0373463317000923>.
7. Perera, L. P., Carvalho, J. P., & Soares, C. G. (2012). Intelligent Ocean Navigation and Fuzzy-Bayesian Decision/Action Formulation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(2), 204–219. <https://doi.org/10.1109/Joe.2012.2184949>.
8. Lyu, H., & Yin, Y. (2018). COLREGS-Constrained Real-time Path Planning for Autonomous Ships Using Modified Artificial Potential Fields. *Journal of Navigation*, 72(3), 588–608. <https://doi.org/10.1017/s0373463318000796>.
9. Mahini, F., DiWilliams, L., Burke, K., & Ashrafiuon, H. (2013). An experimental setup for autonomous operation of surface vessels in rough seas. *Robotica*, 31(05), 703–715. <https://doi.org/10.1017/S0263574712000720>.
10. Serigstad, E. (2017). Hybrid Collision Avoidance for Autonomous Surface Vessels. NTNU. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.460>.
11. Szlapczynski, R., & Krata, P. (2018). Determining and visualizing safe motion parameters of a ship navigating in severe weather conditions. *Ocean Engineering*, 158, 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.092>.
12. Li, S., Liu, J., Cao, X., & Zhang, Y. (2018). A Novel Method for Solving Collision Avoidance Problem in Multiple Ships Encounter Situations. 11184, 47–66. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00898-7_4.
13. Shah, B. C., Švec, P., Bertaska, I. R., Sinisterra, A. J., Klinger, W., von Ellenrieder, K., Gupta, S. K. (2015). Resolution-adaptive risk-aware trajectory planning for surface vehicles operating in congested civilian traffic. *Autonomous Robots*, 40(7), 1139–1163. <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9529-x>.
14. Zhang, W. B., Goerlandt, F., Montewka, J., & Kujala, P. (2015). A method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. *Ocean Engineering*, 107, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.046>.
15. Zhuang, J. Y., Zhang, L., Zhao, S. Q., Cao, J., Wang, B., & Sun, H. B. (2016). Radar-based collision avoidance for unmanned surface vehicles. *China Ocean Engineering*, 30(6), 867–883. <https://doi.org/10.1007/s13344-016-0056-0>.

16. Chen, P., Huang, Y., Mou, J., & van Gelder, P. H. A. J. M. (2018). Ship collision candidate detection method: A velocity obstacle approach. *Ocean Engineering*, 170, 186–198. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.023>.
17. Wiig, M. S., Pettersen, K. Y., & Savkin, A. V. (2017). A Reactive Collision Avoidance Algorithm for Nonholonomic Vehicles. 2017 Ieee Conference on Control Technology and Applications (Ccta 2017), 1776–1783. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.345>.
18. Abdelaal, M., Franzle, M., & Hahn, A. (2018). Nonlinear Model Predictive Control for trajectory tracking and collision avoidance of underactuated vessels with disturbances. *Ocean Engineering*, 160, 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.026>.
19. Lazarowska, A. (2017). A new deterministic approach in a decision support system for ship's trajectory planning. *Expert Systems with Applications*, 71, 469–478. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.11.005>.
20. Lazarowska, A. (2014). Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation. *Journal of Navigation*, 68(02), 291–307. <https://doi.org/10.1017/s0373463314000708>.
21. Kuwata, Y., Wolf, M. T., Zarzhitsky, D., & Huntsberger, T. L. (2014). Safe Maritime Autonomous Navigation With COLREGS, Using Velocity Obstacles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), 110–119. <https://doi.org/10.1109/Joe.2013.2254214>.
22. Saurav Sarkar, Soma Das, Ananya Chanda, Sayan Biswas, Classify Chronic Wounds, Explainable and Responsible Artificial Intelligence in Healthcare, <https://doi.org/10.1002/9781394302444.ch12>, (297–322), (2025).
23. Angelov, P. P., Soares, E. A., Jiang, R., Arnold, N. I., & Atkinson, P. M. (2021). Explainable artificial intelligence: an analytical review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 11(5), e1424. <https://doi.org/10.1002/widm.1424>.

Ben A. P., Pelykhivskyi L. O., Solovey O. S. MODERN METHODS OF PREVENTING SHIP COLLISIONS AND THEIR APPLICATION IN CONTROLLING AUTONOMOUS SHIPS

The article is devoted to the issues of applying methods for preventing ship collisions in the processes of controlling unmanned autonomous vessels (UAVs). A range of important issues of the current state of development of the autonomous and unmanned vessel industry is outlined. A comparative analysis of existing methods for preventing ship collisions is conducted. The disadvantages and advantages of each method are identified, as well as the features of their practical application in UAV control. The structure and distinctive features of the process of controlling the movement of autonomous and unmanned vessels in comparison with vessels controlled by a navigator are presented. The peculiarities of the UAV control process are clarified and a range of methods that should be applied for its implementation is determined. The UAV control methods are considered and the architecture of the control system is proposed, which is based on the combined use of fuzzy logic methods, predictive control and explained artificial intelligence. It has been proven that the combination of various methods of processing navigation information and decision-making allows for high-quality control of UAV movement in real time, in the presence of errors and incompleteness of navigation data. Ways of practical implementation of the proposed architecture of the UAV control system and promising directions of further scientific research in this direction are identified.

Key words: navigation; collision avoidance methods; control systems; ship control; unmanned vessels; autonomous vessels; artificial intelligence; maritime safety.

© Бень А. П., Пелихівський Л. О., Соловей О. С.

Статтю прийнято до редакції 16.06.2025