

МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ЗІТКНЕННЯ АВТОНОМНИХ НАДВОДНИХ СУДЕН З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Бень А. П., д.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;

Вороненко С. В., к.т.н., доцент кафедри експлуатації судового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: voronenko447@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9606-6538.

Стаття присвячена розробці моделі оцінювання ризику зіткнення автономних надводних суден за умов невизначеності стану навколишнього середовища на основі нечіткої логіки. Розглянуто сучасний стан розвитку систем запобігання зіткненням для автономних суден та визначено ключові проблеми, пов'язані з обробкою неповних і неточних навігаційних даних. Проведено порівняльний аналіз існуючих підходів до оцінювання ризику зіткнення, зокрема методів на основі найкоротшої дистанції/часу зближення (ДСРА/ТСРА), та нечіткої логіки, визначено їх переваги та обмеження. Запропоновано концептуальну модель оцінювання ризику зіткнення суден на основі нечіткої логіки, яка забезпечує комплексну оцінку рівня ризику з урахуванням геометричних параметрів зони зближення, впливу факторів навколишнього середовища та індексу невизначеності навігаційної інформації. Особливістю моделі, що запропонована, є виокремлення геометричного та контекстного ризику, а також застосування двоступеневої системи нечіткого логічного висновку з урахуванням обмежень МПЗЗС-72. Показано, що інтеграція методів нечіткої логіки, багатокритеріального аналізу та нових підходів до моделювання невизначеності стану навколишнього середовища дозволяє підвищити достовірність оцінювання ризику в умовах реальної експлуатації автономних суден. Наведено структуру розробленої системи оцінювання ризику, продемонстровано її роботу на типових сценаріях зближення суден та визначено ступінь впливу зовнішніх факторів (вітер, течія, хвилювання) на формування рівня ризику. Визначено напрями подальших досліджень, зокрема використання нечітких систем та методів теорії доказів для врахування невизначеності факторів впливу зовнішнього середовища на управління рухом автономних суден.

Ключові слова: нечітка логіка; оцінювання ризику зіткнення; автономні надводні судна; MASS; ДСРА; ТСРА; МПЗЗС-72; навігаційна безпека; невизначеність; штучний інтелект; системи управління.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.058-070

Вступ. Інтенсивний розвиток індустрії морських автономних надводних суден (MASS) упродовж останнього десятиліття зумовив необхідність стрімкого переходу від простого автоматизованого ведення судна по маршруту до створення та застосування повноцінних систем ситуаційної обізнаності, оцінювання ризику та прийняття рішень з управління судном в умовах складного морського трафіку. Як зазначається у низці оглядових робіт [1, 2], сучасна автономна навігація вимагає не лише точного визначення траєкторії руху, а й здатності інтерпретувати наявну навігаційну обстановку відповідно до принципів доброї морської практики та вимог Міжнародних правил попередження зіткнень суден (МПЗЗС-72, або COLREGs). Подальші дослідження інших авторів [3, 4] підтверджують, що саме зв'язок між формальними алгоритмами, нормативними правилами і реальною поведінкою суден залишається центральною науковою проблемою в системах запобігання зіткненням MASS.

Необхідно підкреслити, що у структурі автономної навігації оцінювання ризику зіткнення виступає базовою ланкою, від якої залежить подальший вибір стратегії розходження, що відповідає вимогам МПЗЗС-72, та визначення множини допустимих маневрів судна. Так, у роботі [5] ризик розглядається як динамічна величина, що має визначатися в реальному часі з урахуванням кількох джерел даних та різної вагомості факторів впливу у різних сценаріях. У свою чергу, оглядові праці [1, 2], показують, що без

наявності надійного модуля оцінювання ризику навіть складні інтелектуальні системи планування траєкторій руху суден і модулі керування не можуть гарантувати безпечну поведінку автономного судна. Отже, саме якість моделі ризику значною мірою визначає практичну придатність усієї автономної навігаційної системи.

З огляду на вищевказане, у роботі зосереджено увагу на вдосконаленні оцінювання ризику зіткнення MASS-суден як на ключовому елементі безпеки автономної навігації. На відміну від існуючих підходів, які обмежуються лише класичними показниками зближення, або лише частково враховують вплив навколишнього середовища, пропонується напрям дослідження орієнтований на інтегроване подання ризику, у якому ДСПА/ТСПА-оцінка навігаційної ситуації доповнюється оцінкою впливу зовнішніх факторів і розглядається в умовах неповноти та неточності навігаційних даних, характерної для реальної експлуатації MASS. Така постановка задачі логічно випливає з виявлених у літературі обмежень практичного застосування існуючих підходів [1, 2, 5–11].

Аналіз існуючих підходів та їх обмежень. Актуальність дослідження. Основою більшості сучасних підходів з виявлення небезпечного зближення суден залишаються класичні показники дистанції (ДСПА) та часу (ТСПА) найбільшого зближення. Вищевказане наведено, зокрема, у роботах [6–8], де зазначені показники формують базове геометричне ядро ризику, а далі масштабуються або комбінуються з іншими індикаторами, або подаються в нечітку систему висновку. Поширеність та базовість застосування ДСПА/ТСПА у сучасній літературі пояснюється їх фізичною зрозумілістю: вони відповідають на два основних питання навігатора – наскільки близьким буде зближення та через який час воно стане критичним. Водночас слід враховувати, що сама по собі геометрія зближення не описує повною мірою складність реального середовища руху MASS.

Особливо складним для задач оцінювання ризику зіткнень автономних суден є врахування впливу зовнішніх умов, зокрема вітру, течії, хвилювання, а також невизначеності стосовно спостережень щодо наявної навігаційної ситуації і прогнозу стосовно її розвитку. Так, у роботі [9] на основі AIS-даних та гідрометеорологічних даних кількісно показано, що вплив вітру і течії на рух суден є суттєвим і неоднорідним. У роботі [7] вплив навколишнього середовища представлено як окремий фактор (Environmental Factor), який поєднується з базовою оцінкою ризику зіткнень (CRI – collision risk index) у показник ECRI-W (exchanged collision risk index – weather). Більш глибоко напрям формального врахування невизначеності впливу зовнішнього середовища розглянуто у роботі [8], в якій для обробки AIS-даних застосовано інтервальну нечітку систему другого типу та запропоновано застосування теорії доказів згідно з принципами Демпстера–Шейфера (Dempster–Shafer fusion). Таким чином, сучасний стан досліджень переконливо показує, що для вирішення проблем ефективного керування MASS-суднами в умовах впливу зовнішніх факторів необхідно застосування такої моделі оцінки ризику зіткнень, яка одночасно поєднує геометрію зближення, вплив навігаційного середовища та явне подання невизначеності вхідної навігаційної інформації.

Слід окремо зазначити, що у більшості існуючих практичних розробок першим кроком залишається обчислення ДСПА і ТСПА за відносним рухом суден. Така постановка є природною, оскільки зазначені показники безпосередньо відображають геометрію небезпечного зближення. Так, у роботі [6] вказаний підхід розширено для сценаріїв, що регламентують процеси розходження декількох суден: автори використовують безрозмірні ДСПА' і ТСПА', вводять нечіткі правила відповідно до вимог МПЗЗС-72 і формують рішення на основі не лише ризику зближення, а й кутів зустрічі та відносних положень суден. Перевага вказаного підходу полягає в інтерпретованості та відповідності рішень, які приймаються, до вимог морської практики. Водночас слід підкреслити, що така модель спирається переважно на геометрію зближення та експертно сформовані правила, а отже її чутливість до невизначеності і похибок навігаційних даних, а також зовнішніх збурень, залишається обмеженою.

У статті [12] зроблено наступний крок далі: крім DCPA і TCPA, автори враховують кут перетину курсів і навігаційне середовище, а потім, за допомогою методів нечіткої логіки (fuzzy logic) і методу аналізу ієрархій (АНР) формують локальну оцінку можливості зіткнень для ситуацій розходження декількох суден. Вказаний підхід має істотні переваги, тому що він дозволяє аналізувати складні сценарії розходження множини суден та дозволяє сформувавши певну картину руху в заданій акваторії, що дозволяє сформувавши упереджувальні (проактивні) дії із залученням систем берегового моніторингу та контролю руху суден. Разом із тим, у доступному описі моделі основну роль усе ж відіграє структура експертно обраних факторів і ваг, тоді як питання достовірності та неповноти вхідних даних не винесено в окремий формалізований блок. Саме тому підхід є ефективним лише при вирішенні питань оцінки навігаційних ризиків у певній акваторії, проте він недостатньо повно враховує похибки спостережень та є чутливим до якості навігаційних даних.

Альтернативний напрям оцінки ризиків представлений методами на основі швидкісних завад (velocity obstacle, VO). У роботі [13] запропоновано застосування індексу MPC (Most Probable Collision – індекс імовірного зіткнення), який поєднує VO-геометрію з AIS-даними про розміри суден, завдяки чому підвищується адекватність оцінки ризиків у системах уникнення зіткнень. У роботі [14] вказаний підхід розширено шляхом застосування методу нелінійних швидкісних завад (UNLVO), де враховано динамічні характеристики руху суден. В цілому, перевага VO-підходів полягає в чіткій просторовій інтерпретації небезпеки та природному зв'язку з маневруванням. Проте, у вказаній групі методів залишаються відкритими принаймні дві проблеми: по-перше, не завжди просто поєднати геометрію з правовою логікою дотримання вимог МПЗС-72 у складних змішаних сценаріях; по-друге, навіть коли невизначеність уже враховується, вона часто стосується передусім динаміки руху, а не повного ланцюжка дані–інтерпретація–висновок.

В окремий клас методів оцінювання ризиків зіткнень слід виділити методи, що базуються на застосуванні моделей небезпечної зони, або домену судна (ship domain). Так, у роботі [15] ризик визначається не лише через близькість зближення, а й через ступінь порушення домену судна, відносну швидкість, комбінацію курсів, порушення зони маневрування та складність навігаційної ситуації зближення. Сильна сторона цього підходу полягає в тому, що він краще за класичні DCPA/TCPA-пороги відображає контекст, зокрема запізнілі маневри та вплив навколишнього трафіку. Водночас і тут наявні обмеження: хоча підхід на основі домену судна добре відображає просторово-поведінковий аспект ситуації, однак сам по собі не враховує вплив погодних збурень і не замінює явного моделювання достовірності AIS-даних чи часове накопичення доказів ризику.

Суттєвий крок у напрямі врахування впливу навколишнього середовища зроблено у працях [3] та [7]. У першій роботі кількісно показано, що вітер і течія реально змінюють поведінку суден у портах і водних шляхах, причому вказаний вплив залежить від розміру судна. У другій роботі автори формують інтегральний показник ECRI-W шляхом поєднання базового CRI з погодним фактором, після чого застосовують модель глибокого навчання для прогнозування рівня ризику зіткнення.

У роботі [6] наведено інший підхід до більш «морепрактичного» індексу ризику: автори вводять нечіткий динамічний еліптичний домен судна (Fuzzy Dynamic Elliptical Ship Domain), небезпечну (dangerous domain) та заборонену (forbidden domain) зони, параметр відповідальності (responsibility-aware parameter) та вагове поєднання факторів на основі вдосконаленого методу аналізу ієрархій (improved АНР). Вищевказане важливо, оскільки ризик у такому випадку пов'язується не лише з геометрією зближення, а й із роллю судна відповідно до вимог МПЗС-72 (як судна, що повинно поступитися дорогою, або судна, що зберігає курс і швидкість). Подібний підхід також застосовано у роботі [12], де інтегральний індекс ризику зіткнення CRI формується на основі базового та середовищного ризику, після чого використовується для прийняття рішень з маневрування судна. Проте навіть за такої деталізації питання оцінки невизначеності навігаційних даних, а також часової несталості

оцінки залишаються слабо формалізованими порівняно з підходом, представленим у роботі [9].

Найбільш послідовне розв'язання вказаної проблеми запропоновано в роботах [5] та [8]. У роботі [5] ризик оцінюється як багатокритеріальна величина з кількох джерел даних, а підсумкова оцінка формується через теорію доказів. У статті [9] невизначеність уже винесена в центр моделі: інтервальна нечітка система другого типу моделює невизначеність функцій належності, а комбінування доказів за теорією Демпстера–Шафера забезпечує часову інтеграцію факторів ризику. Слід додатково відзначити, що для вирішення задач керування автономними суднами недостатньо просто додати ще один фактор у CRI – потрібно ще й описати, наскільки надійними є дані та як змінюється оцінка ризику в часі. Крім того, у роботах [10] та [15] показано, що навіть за наявності якісної моделі оцінювання ризику залишаються проблеми у вирішенні задач, пов'язаних з урахуванням особливостей правил руху суден в обмежених водах. Окремою проблемою є відсутність єдиної системи тестових сценаріїв для перевірки створених моделей і алгоритмів керування рухом MASS.

Таким чином, попри значну кількість досліджень у сфері оцінювання ризику зіткнення суден та керування рухом MASS, більшість наявних підходів або зосереджуються переважно на геометрії зближення на основі DCPA/TCPA, або враховують окремі контекстні фактори, без явного моделювання невизначеності вхідних даних. У частині робіт детально розглянуто правила прийняття рішень відповідно до вимог МПЗЗС-72 [6, 10, 16], у частині – багатосуднові сценарії розходження або врахування особливостей поточної навігаційної ситуації [12, 14, 15], а в частині – вплив навігаційного середовища та погодних умов [7, 9]. Водночас лише обмежена кількість досліджень безпосередньо ставить у центр уваги структурну невизначеність AIS-даних і часову акумуляцію факторів ризику [5, 8, 17], внаслідок чого недостатньо опрацьованою залишається проблема інтегрованого оцінювання ризику зіткнення для MASS в умовах одночасного впливу факторів впливу навколишнього середовища, невизначеності (неточності або помилковості) навігаційних даних та навігаційної ситуації (геометрії взаємного розташування та параметрів руху суден).

Отже, проведений аналіз літературних джерел надає можливість визначити ключові питання проблеми керування рухом автономних суден та шляхи їх вирішення. У підсумку слід зазначити наступне. По-перше, врахування параметрів DCPA/TCPA залишається основою майже всіх моделей оцінки ступеня ризику зіткнень MASS. По-друге, сучасні автори вже намагаються доповнювати його моделями домену судна, урахуванням відповідальності відповідно до вимог МПЗЗС-72, багатосудновими сценаріями та врахуванням впливу погодних факторів. По-третє, формальне моделювання невизначеності комплексного впливу вищезазначених факторів поки що представлено значно вужчим колом робіт. Тому невирішеною раніше частиною проблеми є побудова такої інтегрованої моделі оцінювання ризику для MASS, яка одночасно поєднувала б геометрію зближення, оцінку стану навігаційного середовища, багатосуднові сценарії розходження і неповноту (помилковість або неточність) вхідних навігаційних даних у єдиному контурі оцінки. Вищевказане дозволяє сформулювати мету та основні задачі дослідження.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є розробка моделі оцінювання ризику зіткнення автономних надводних суден з урахуванням впливу навколишнього середовища. Для досягнення поставленої мети слід вирішити низку наступних задач:

1. Провести порівняльний аналіз існуючих підходів до вирішення проблеми керування автономними суднами та оцінки ризиків їх зіткнення в умовах неповноти та неточності навігаційних даних і впливу зовнішнього середовища, визначити можливі шляхи її розв'язання.

2. Розробити концептуальну модель оцінювання ризику зіткнення суден на основі нечіткої логіки, яка забезпечує комплексну оцінку рівня ризику з урахуванням геометричних параметрів зони зближення, впливу факторів навколишнього середовища та індексу невизначеності навігаційної інформації.

3. Розробити програмні засоби та провести тестове імітаційне моделювання типових навігаційних ситуацій з метою оцінки ризиків зіткнення суден із застосуванням розробленої моделі.

Основна частина. У статті пропонується підхід до оцінювання ризику зіткнення, у якому оцінка ризику зіткнень суден за величинами DCPA/TCPA розглядається у якості базової основи, яка доповнюється оцінками зовнішніх факторів впливу навігаційного середовища та розглядається за умов наявності часткової невизначеності вхідної інформації (неточності або неповноти навігаційних даних). Вказана постановка задачі дозволяє перейти від спрощеної оцінки ризиків зіткнення суден лише за параметрами зближення та їх взаємного розташування до більш реалістичного та інтегрального оцінювання ризиків, яке краще відповідає специфіці застосування MASS, вимогам МПЗЗС-72, та реальним умовам експлуатації автономних суден в умовах інтенсивного морського трафіку.

Пропонована концептуальна модель оцінювання ризику зіткнення для автономного надводного судна (далі – «власне судно», ВС, або «own ship», OS), орієнтована на роботу з навігаційною AIS-інформацією відносно станів суден-цілей (далі – «судно-ціль», ЦС, або «target ship», TS) та враховує вплив факторів невизначеності.

Запропонована модель узгоджується з перспективними сучасними тенденціями створення методів керування MASS, а також оцінки та зниження ризиків їх зіткнень: розрахунки ризиків за геометричними параметрами взаємного розташування та руху суден та ризиків, що виникають внаслідок зовнішніх впливів [7], врахування вимог МПЗЗС-72 у поєднанні з межами домену судна, що зазнає адаптивних змін [15], використання багатокритеріальних оцінок та нечіткої логіки [8, 12, 16].

Згідно з розробленою концептуальною моделлю, комплексна оцінка рівня ризику зіткнення суден здійснюється шляхом послідовного виконання низки розрахункових процедур, які наведені далі.

1. *Геометрична оцінка навігаційної ситуації.* Здійснюється визначення взаємного розташування суден та розрахунок геометричних параметрів їх зближення – визначаються DCPA/TCPA кожного ЦС. З метою зменшення залежності функцій належності від розмірів судна застосовується безрозмірна нормалізація вхідних даних, згідно з підходом, запропонованим у роботі [5]:

$$D^* = \frac{DCPA}{L_o} \quad T^* = \frac{TCPA}{L_o / \|v_0\| + \varepsilon} \quad (1)$$

де L_o – довжина власного судна, ε – малий доданок для уникнення ділення на нуль.

Додатковими даними опису навігаційної ситуації є: $\Delta\psi$ – відносний курс цілі (для розпізнавання типу навігаційної ситуації (зустрічний курс, перетин курсів, обгін), їх швидкості та значення $k_v = \|v_T\| / \|v_0\|$ – відношення швидкостей, яке використовується як одна з ключових ознак у розширених CRI-методиках [6].

2. *Визначення впливу зовнішнього середовища та індексу невизначеності (достовірності) навігаційної інформації.* Вплив зовнішнього середовища оцінюється з урахуванням двох складових: стану зовнішнього середовища – (E) та невизначеності оцінки стану зовнішнього середовища – (U).

До складової (E) входять: вітер (швидкість (V_g), напрям (w)), видимість (V_{is}), течія (швидкість (V_c), напрям (c)), рівень хвилювання (бали). Складова $U \in [0,1]$ являє собою нечітку оцінку якості наявної навігаційно-метеорологічної інформації (за часом оновлення, узгодженістю між джерелами, дисперсією прогнозу або доступністю даних), оскільки у контексті автономного судноводіння невизначеність середовища проявляється не лише як фізичний вплив, а як помилка прогнозу та звуження маневрового простору.

3. *Нечіткий логічний висновок.* Нечіткий логічний висновок здійснюється з урахуванням двох складових: рівня ризику зіткнення суден, який обумовлений їх взаємним розташуванням відповідно до навігаційної ситуації, що має місце, $-R_{geo}$ (FIS-1 – геометричний ризик, входи: $D^*, T^*, \Delta\psi, k_v$, вихід – R_{geo}), ризику, спричиненого впливом зовнішнього середовища, $-R_{env}$ (FIS-2, ризик зовнішніх впливів, входи: E та U , вихід – R_{env}).

Узагальнена оцінка ризику, може бути представлена у вигляді:

$$R = Defuzz(G(R_{geo}, R_{env}, p)), \quad (2)$$

де p – параметр чутливості моделі, який визначає рівень загального ризику з урахуванням типу навігаційної ситуації (дотримання вимог МПЗЗС-72).

Відповідно до отриманого рівня ризику формується вибір маневру автономного судна, що спрямований на його зменшення і відповідає вимогам МПЗЗС-72, та, у випадку перевищення заданого порогу, формується сигнал тривоги.

4. *Визначення маневру судна та дій його рушійно-керуючого комплексу.* Рух автономного судна відбувається відповідно до запланованої траєкторії руху за умов неперевикнення порогових значень рівня ризику, в іншому випадку здійснюється зміна траєкторії руху та/або швидкості, яка відповідає вимогам МПЗЗС-72 та забезпечує зниження рівня ризику.

Структура запропонованої системи оцінювання ризику зображена на рис. 1. Вона включає в себе: модуль збору даних (AIS + навігаційні датчики + метео/гідро), модуль оцінювання геометрії зближення та прогнозу DCPA (обчислення $D^*, T^*, \Delta\psi, k_v$), модуль оцінювання стану навколишнього середовища та індексу невизначеності навігаційних даних E, U модуль нечіткого логічного висновку (FIS-1/FIS-2 + МПЗЗС-72), модуль оцінки підсумкового рівня ризику R та оцінки критичності ситуації, модуль планування маневру, та модуль керування рушійно-керуючим комплексом автономного судна.



Рисунок 1 – Структурна схема системи оцінювання ризиків зіткнень MASS

Таким чином, відповідно до запропонованого методу оцінки ризиків зіткнення автономних суден, при однаковій геометрії зближення, погіршення стану навколишнього середовища та/або зростання невизначеності навігаційних даних сприяє підвищенню рівня підсумкового ризику, оскільки зростає похибка прогнозу та зменшується запас керованості судном.

З метою перевірки працездатності і валідності запропонованої методики оцінювання ризиків зіткнення автономних суден із застосуванням вищенаведеної моделі на основі нечіткої логіки, було розроблено авторське програмне забезпечення для проведення імітаційного сценарного моделювання.

Програмну реалізацію виконано мовою JavaScript у середовищі Node.js, що дозволяє запускати моделювання локально, формувати табличні результати у форматі CSV та генерувати графічну візуалізацію зміни ризику в часі. Розроблене програмне середовище призначене для попередньої аналітичної апробації моделі в типових ситуаціях зближення

суден і дозволяє дослідити, як змінюється підсумковий ризик залежно від геометрії руху, стану навколишнього середовища, невизначеності вхідних даних та вимог МПЗЗС-72.

Перед початком імітаційного моделювання в програмі задаються опорні параметри сценарію моделювання: кількість суден, початкові координати власного судна та цільових суден, швидкість, курс руху, тип ситуації зближення, ролі суден, а також параметри навколишнього середовища: швидкість вітру, швидкість течії, рівень хвилювання, видимість та умовна оцінка якості AIS-даних. Для кожного судна рух задається у двовимірній площині, координати подаються в морських милях, швидкість у вузлах, а курс у градусах. Також, з метою розрахунку величин D^* та T^* зазначається довжина L власного судна (у наведених нижче сценаріях імітаційного моделювання застосовано значення $L=100$ м). Для оцінки рівня ризику застосовано наступну лінгвістичну шкалу: 0.00–0.30 – низький; 0.31–0.60 – середній; 0.61–0.80 – високий; 0.81–1.00 – критичний.

Таблиця 1 – Сценарії імітаційного моделювання навігаційних ситуацій

№	Кількість суден	Тип ситуації зближення	Стан навколишнього середовища	МПЗЗС-72-роль ВС/ЦС	Поведінка ЦС або групи суден
1	2	3	4	5	6
1	2	Рух на зустрічних курсах за помірних умов	Помірний вітер 10–15 вуз., хвилювання 2 бали, добра видимість	Взаємне розходження, обидва судна діють за логікою зустрічного зближення	Прогнозована, своєчасна реакція обох суден
2	2	Рух на зустрічних курсах за помірних умов без своєчасної зміни курсу ЦС	Помірні умови, добра видимість	Взаємне розходження, затримка маневру ЦС	Інертна або запізнена реакція
3	2	Перетин курсів, ВС повинно поступитися дорогою	Добра видимість, слабка течія	ВС – судно, що має поступитися дорогою, ЦС – судно, що зберігає курс і швидкість	ЦС діє прогнозовано, зберігає курс і швидкість
4	2	Перетин курсів за умов сильного вітру та течії	Вітер 22–28 вуз., течія 1.5–2.0 вуз., хвилювання 3–4 бали	ВС – судно, що має поступитися дорогою, ЦС – судно, що зберігає курс і швидкість	Поведінка загалом прогнозована, але маневр ускладнений зовнішніми збуреннями
5	2	Перетин курсів, у якому ВС зберігає курс і швидкість, але ЦС не виконує очікуваний маневр	Помірні умови, добра видимість	ВС – судно, яке зберігає курс і швидкість, ЦС – судно, що має поступитися дорогою	Порушення правил МПЗЗС-72, відсутній своєчасний маневр ЦС
6	2	Обгін за спокійних умов	Спокійне море, добра видимість	Судно, яке обганяє / судно, яке обганяють	Прогнозована поведінка, стабільна швидкість, прогнозований маневр
7	2	Обгін із раптовим зменшенням швидкості ЦС	Спокійне море, добра видимість	Судно, яке обганяє / судно, яке обганяють	Несподіване зменшення швидкості ЦС
8	3	Багатосуднова ситуація з трьома суднами в обмеженій акваторії	Обмежена акваторія, помірний вітер, інтенсивний локальний трафік	ВС одночасно взаємодіє з двома ЦС, різні ролі для пар суден	Одне судно діє прогнозовано, інше реагує із запізненням

Продовження Таблиці 1

1	2	3	4	5	6
9	4	Багатосуднова ситуація з чотирма суднами та різними МПЗЗС-72-ролями	Обмежена акваторія маневру, помірне хвилювання, неоднорідний трафік	Для різних пар одночасно виникають ролі судна, що зберігає курс і швидкість, та судна, що має поступитися дорогою	Частково інертна реакція суден, обмежена акваторія для маневру
10	2–3	Ситуація «торговельне судно + риболовне судно»	Прибережний район, помірне хвилювання, активна риболовна обстановка	Роль залежить від фактичного статусу риболовного судна та геометрії зближення	Нерегулярна траєкторія або змінний режим швидкості риболовного судна
11	2–3	Перегин курсів із неповними або відсутніми AIS-даними	Помірні погодні умови, але низька якість AIS-даних	Роль визначається з нижчою достовірністю через неповноту даних	Поведінка частково спостережувана; прогноз руху нестійкий
12	3+	Багатосуднова ситуація за поганої видимості	Видимість < 1 милі, хвилювання 3 бали, обмежений простір для маневру	Для кількох пар суден виникають різні ролі, окремі взаємодії потребують термінового маневру судна, що має поступитися дорогою	Переважно обережна, але неоднорідна за темпом реакція кожного судна з групи
13	4+	Багатосуднова ситуація із сильним вітром, течією та непередбачуваною поведінкою одного із суден	Вітер 25–30 вуз., течія 1.5–2.0 вуз., хвилювання 4–5 балів, знижена видимість	Для кількох пар суден виникають різні ролі, окремі взаємодії потребують термінової дії	Одне судно діє непередбачувано/ризиково, інші маневрують з обмеженнями
14	2	Перегин курсів зі своєчасним маневром ВС	Ускладнені, але контрольовані умови: вітер близько 22 вуз., течія близько 1.4 вуз., хвилювання 3–4 бали, помірна видимість	ВС – судно, що має поступитися дорогою; ЦС – судно, що зберігає курс і швидкість	ЦС зберігає курс і швидкість; ВС своєчасно виконує МПЗЗС-72-узгоджений маневр, внаслідок чого дистанція розходження збільшується, а ризик поступово зменшується
15	2	Обгін із корекцією дистанції	Помірно ускладнені умови: вітер близько 23 вуз., течія близько 1.3 вуз., хвилювання 3–4 бали, помірна видимість	Судно, яке обганяє / судно, яке обганяють, взаємна ситуаційна відповідальність	ЦС рухається стало, ВС коригує траєкторію обгону та підтримує безпечну бокову дистанцію, через що ДСРА збільшується, ТСПА віддаляється, а підсумковий ризик знижується

У процесі роботи програма моделює переміщення суден у часі з фіксованим часовим кроком. На кожному кроці для кожної пари «ВС – ЦС» обчислюються параметри найближчої

точки зближення ДСРА і ТСРА, їх нормовані значення, та визначається геометричний ризик R_{geo} . Далі окремо здійснюється розрахунок ризику R_{env} , що враховує вплив вітру, течії, хвилювання та видимості. Також формується індекс невизначеності U , який відображає надійність вхідних даних і прогнозу руху суден. МПЗЗС-72 використовуються як процедурний модифікатор, що дозволяє врахувати, чи є ВС судном, що повинно поступитися дорогою, судном, що має зберігати курс і швидкість, або учасником багатосуднової ситуації зі змішаними ролями.

За результатами імітаційного моделювання вищенаведених сценаріїв були отримані окремі та узагальнені оцінки рівнів ризику (табл. 2).

Таблиця 2 – Результати fuzzy-based оцінювання ризику зіткнення суден за сценаріями

№	ДСРА, nm	ТСРА, хв	U	R_{geo}	R_{env}	R_{total}	Рівень ризику
1	0.28	12	0.18	0.64	0.24	0.49	Середній
2	0.19	10	0.22	0.76	0.25	0.67	Високий
3	0.26	13	0.18	0.58	0.20	0.54	Середній
4	0.24	12	0.38	0.61	0.62	0.72	Високий
5	0.25	12	0.22	0.60	0.24	0.80	Високий
6	0.40	22	0.10	0.32	0.10	0.23	Низький
7	0.20	10	0.18	0.71	0.12	0.64	Високий
8	0.19*	8*	0.40	0.74	0.44	0.76	Високий
9	0.16*	7*	0.46	0.80	0.48	0.83	Критичний
10	0.22	10	0.52	0.64	0.36	0.75	Високий
11	0.26	13	0.72	0.58	0.20	0.68	Високий
12	0.18*	8*	0.65	0.75	0.71	0.86	Критичний
13	0.15*	6*	0.68	0.84	0.83	0.92	Критичний
14	0.85	24	0.16	0.18	0.22	0.28	Низький
15	0.70	25	0.12	0.22	0.10	0.24	Низький

* – у зазначених рядках рівень ризику розраховано для найбільш небезпечного судна

Для багатосуднових сценаріїв програма виконує попарне оцінювання взаємодій між власним судном і кожним цільовим судном. У поточній реалізації для підсумкового представлення обирається найбільш небезпечна пара суден за максимальним значенням R_{total} . Такий підхід дозволяє виділити найкритичнішу взаємодію в межах багатосуднової навігаційної ситуації. Результати роботи програми зберігаються у вигляді таблиць CSV, які можуть бути використані для подальшого аналізу та побудови графіків. Додатково програмне забезпечення формує графічну візуалізацію зміни R_{total} , R_{geo} та R_{env} у часі для кожного окремого сценарію. Така візуалізація дозволяє простежити, як підсумковий ризик змінюється впродовж розвитку конкретної ситуації зближення. На рис. 2 наведено приклад роботи програми для сценарію 4.

Окрім графіків для окремих сценаріїв, програмне середовище формує порівняльну візуалізацію динаміки підсумкового ризику для кількох репрезентативних сценаріїв. Для прикладу такого порівняння обрано сценарії 1, 4, 8, 13 та 14, які охоплюють різні типи ситуацій: зустріч на зустрічних курсах, перетин курсів за складних умов, безпечний обгін, багатосуднову ситуацію та критичну багатосуднову ситуацію за умов сильного впливу середовища. Зазначена можливість дозволяє зробити наочне порівняння відмінності отриманих рівнів ризику залежно від типу зближення, зовнішніх умов та складності навігаційної ситуації, рис. 3.

З метою підвищення відтворюваності дослідження вихідний код авторського програмного середовища розміщено у відкритому GitHub-репозиторії: <https://github.com/lpelykhivskiy/mass-collision-risk-simulation> [18].

Сценарій 4 – перетин курсів за умов сильного вітру та течії
 Вітер 22-28 kn, течія 1.5-2.0 kn, хвилювання 3-4 бали. OS – give-way; TS – stand-on. Поведінка загалом прогнозована, але маневр ускладнений зовнішніми збуреннями.

(index)	time_min	target_ship	dcpa_nm	tcpa_min	d_star	t_star	r_geom	r_env	u	c_colregs	r_total	risk_level
0	0	'TS-1'	2.055	13.53	38.059	49.93	0.317	0.619	0.386	0.65	0.459	'Середній'
1	1	'TS-1'	1.964	12.5	36.373	46.129	0.345	0.619	0.386	0.65	0.483	'Середній'
2	2	'TS-1'	1.874	11.58	34.706	42.734	0.37	0.619	0.385	0.65	0.507	'Середній'
3	3	'TS-1'	1.783	10.75	33.021	39.671	0.392	0.619	0.385	0.65	0.526	'Середній'
4	4	'TS-1'	1.692	10.02	31.336	36.977	0.413	0.619	0.385	0.65	0.546	'Середній'
5	5	'TS-1'	1.601	9.4	29.651	34.689	0.431	0.619	0.385	0.65	0.563	'Середній'
6	6	'TS-1'	1.511	8.87	27.984	32.733	0.448	0.619	0.384	0.65	0.578	'Середній'
7	7	'TS-1'	1.42	8.44	26.298	31.146	0.464	0.619	0.384	0.65	0.593	'Середній'
8	8	'TS-1'	1.329	8.12	24.613	29.965	0.477	0.619	0.384	0.65	0.606	'Високий'
9	9	'TS-1'	1.238	7.89	22.928	29.117	0.49	0.619	0.383	0.65	0.619	'Високий'
10	10	'TS-1'	1.147	7.77	21.242	28.674	0.502	0.619	0.383	0.65	0.631	'Високий'
11	11	'TS-1'	1.057	7.74	19.576	28.563	0.513	0.62	0.383	0.65	0.642	'Високий'
12	12	'TS-1'	0.966	7.81	17.89	28.821	0.523	0.62	0.382	0.65	0.652	'Високий'
13	13	'TS-1'	0.875	7.99	16.205	29.486	0.533	0.62	0.382	0.65	0.663	'Високий'
14	14	'TS-1'	0.787	8.26	14.575	30.482	0.543	0.62	0.382	0.65	0.672	'Високий'
15	15	'TS-1'	0.71	8.63	13.149	31.848	0.553	0.62	0.382	0.65	0.679	'Високий'
16	16	'TS-1'	0.64	9.11	11.853	33.619	0.563	0.62	0.381	0.65	0.7	'Високий'
17	17	'TS-1'	0.565	9.68	10.464	35.722	0.574	0.62	0.381	0.65	0.706	'Високий'
18	18	'TS-1'	0.477	10.35	8.834	38.195	0.584	0.62	0.381	0.65	0.711	'Високий'
19	19	'TS-1'	0.371	11.13	6.871	41.073	0.606	0.62	0.38	0.65	0.72	'Високий'
20	20	'TS-1'	0.24	12	4.445	44.284	0.61	0.62	0.38	0.65	0.72	'Високий'

CSV saved to: /Users/leonidpelykhivskiy/PhD/projects/mass-collision-risk-simulation/simulation_results/scenario_4_results.csv
 SVG plot saved to: /Users/leonidpelykhivskiy/PhD/projects/mass-collision-risk-simulation/simulation_results/scenario_4_risk_plot.svg

Рисунок 2 – Зміни геометричного, середовищного та підсумкового ризику зіткнення для сценарію 4

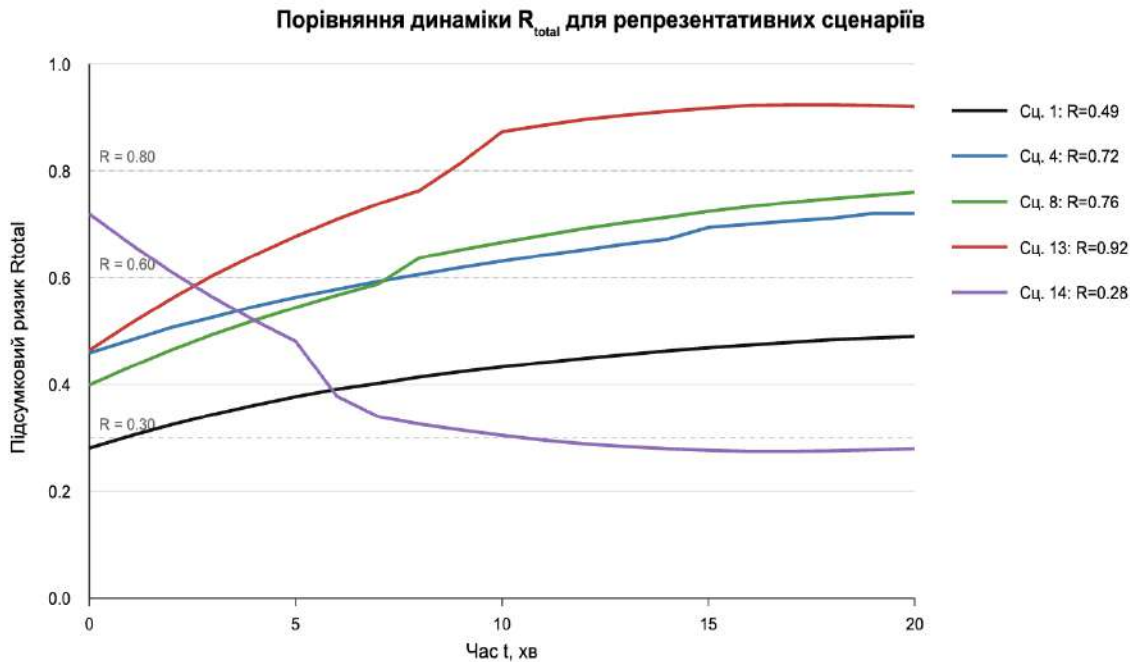


Рисунок 3 – Порівняння динаміки підсумкового ризику R_{total} для різних сценаріїв

Репозиторій містить реалізацію сценарного моделювання, приклади вхідних сценаріїв, розрахунок ДСПА/ТСПА, нормалізацію параметрів зближення, оцінювання геометричного та середовищного ризику, індексу невизначеності, дотримання вимог МПЗС-72 та формування підсумкового ризику.

Слід зазначити, що розроблене програмне забезпечення носить дослідницький і демонстраційний характер, і його основне призначення полягає в апробаційній перевірці логічної узгодженості запропонованої моделі та демонстрації можливості її подальшої програмної реалізації в системах підтримки прийняття рішень MASS. Подальша валідація моделі має передбачати використання реальних AIS-даних, AIS+weather вибірок або професійного навігаційного симулятора.

Висновки. Розроблено концептуальну модель оцінювання ризику зіткнення для автономних надводних суден, яка поєднує класичні параметри $DCPA/TCPA$ з додатковими

кінематичними індикаторами ($\Delta\psi, k_v$) та факторами впливу навколишнього середовища (вітер/течія/хвилювання/видимість), що дозволяє врахувати особливості оцінки ризиків зіткнень та процесів керування, які притаманні автономним надводним суднам (MASS). Відмінними рисами, що визначають наукову новизну запропонованого підходу у порівнянні з вже існуючими, є те, що у розробленій моделі поєднано, але структурно розподілено врахування навігаційних ризиків, обумовлених як геометричними параметрами розташування та руху суден, так і факторами впливу зовнішнього середовища, неповноти або помилковості наявних навігаційних даних, а також дотриманням вимог МПЗЗС-72.

Практичне значення розробки полягає в тому, що запропонована модель може бути використана як для оцінки ризику у автоматизованих системах планування маневру автономних суден, а також у берегових центрах моніторингу руху MASS.

Обмеження моделі є типовими для нечітких систем заснованих на правилах – функції належності та правила потребують калібрування під район плавання та клас судна. Також слід враховувати, що для створення практично придатних та сертифікованих систем автоматизованого керування рухом MASS потрібна належна валідація на широкому наборі сценаріїв та зовнішніх факторів впливу.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно проводити у напрямку вивчення впливу на рівень ризиків зіткнень MASS окремих районів плавання, типів суден та погодних умов. Окремим важливим напрямком подальших досліджень постає визначення та вивчення емпіричних закономірностей поведінки суден у типових навігаційних ситуаціях та під впливом характерних погодних умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang X., et al. Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey. *Ocean Engineering*. 2021;235:109380. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109380>.
2. Burmeister H.-C., Constapel M. Autonomous Collision Avoidance at Sea: A Survey. *Frontiers in Robotics and AI*. 2021;8:739013. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.739013>.
3. Sarhadi P., Naeem W., Athanasopoulos N. A Survey of Recent Machine Learning Solutions for Ship Collision Avoidance and Mission Planning. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(31):257–268. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.440>.
4. Zhu Q., Xi Y., Weng J., Han B., Hu S., Ge Y.-E. Intelligent ship collision avoidance in maritime field: A bibliometric and systematic review. *Expert Systems with Applications*. 2024;252(Part A):124148. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124148>.
5. Yu Q., Teixeira A. P., Liu K., Guedes Soares, C. Framework and application of multi-criteria ship collision risk assessment. *Ocean Engineering*. 2022;250:111006. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111006>.
6. Ahmed Y. A., et al. COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;9(8):790. <https://doi.org/10.3390/jmse9080790>.
7. Korupoju A. K., Kapadia V., Vilwathilakam A. S., Samanta A. Ship Collision Risk Evaluation using AIS and weather data through fuzzy logic and deep learning. *Ocean Engineering*. 2025;318:120116. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120116>.
8. Park J. Estimation of Vessel Collision Risk Under Uncertainty Using Interval Type-2 Fuzzy Inference Systems and Dempster–Shafer Evidence Theory. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2026;14(1):34. <https://doi.org/10.3390/jmse14010034>.
9. Zhou Y., Daamen W., Vellinga T., Hoogendoorn S. P. Impacts of wind and current on ship behavior in ports and waterways: A quantitative analysis based on AIS data. *Ocean Engineering*. 2020;213:107774. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107774>.

10. Hansen P. N., Enevoldsen T. T., Papageorgiou D., Blanke M. Autonomous Navigation in Confined Waters – A COLREGs Rule 9 Compliant Framework. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(31):222–228. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.435>.
11. Sawada R., Sato K., Minami M. Framework of safety evaluation and scenarios for automatic collision avoidance algorithm. *Ocean Engineering*. 2024;300:117506. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117506>.
12. Shi Z., Zhen R., Liu J. Fuzzy logic-based modeling method for regional multi-ship collision risk assessment considering impacts of ship crossing angle and navigational environment. *Ocean Engineering*. 2022;111847. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111847>.
13. Zhao L., Fu X. A novel index for real-time ship collision risk assessment based on velocity obstacle considering dimension data from AIS. *Ocean Engineering*. 2021;240:109913. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109913>.
14. Gai X., Zhang Q., Hu Y., Wang G. A Fuzzy Fusion Method for Multi-Ship Collision Avoidance Decision-Making with Merchant and Fishing Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024;12(10):1822. <https://doi.org/10.3390/jmse12101822>.
15. Szlapczynski R., Szlapczynska J. A ship domain-based model of collision risk for near-miss detection and Collision Alert Systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;214:107766. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107766>.
16. Cheng K., et al. A novel fuzzy comprehensive evaluation method for ship collision risk. *Ocean Engineering*. 2025;332:121462. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121462>.
17. Yuan X., Zhang D., Zhang J., Zhang M., Guedes Soares C. A novel real-time collision risk awareness method based on velocity obstacle considering uncertainties in ship dynamics. *Ocean Engineering*. 2021;220:108436. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108436>.
18. <https://github.com/lpelykhivskyi/mass-collision-risk-simulation>.

REFERENCES

1. Zhang, X., et al. (2021). Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey. *Ocean Engineering*. 2021;235:109380. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109380>.
2. Burmeister, H.-C., Constapel, M. (2021). Autonomous Collision Avoidance at Sea: A Survey. *Frontiers in Robotics and AI*. 2021;8:739013. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.739013>.
3. Sarhadi, P., Naem, W., Athanasopoulos, N. (2022). A Survey of Recent Machine Learning Solutions for Ship Collision Avoidance and Mission Planning. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(31):257–268. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.440>.
4. Zhu, Q., Xi, Y., Weng, J., Han, B., Hu, S., Ge, Y.-E. (2024). Intelligent ship collision avoidance in maritime field: A bibliometric and systematic review. *Expert Systems with Applications*. 2024;252(Part A):124148. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124148>.
5. Yu, Q., Teixeira, A. P., Liu, K., Guedes Soares, C. (2022). Framework and application of multi-criteria ship collision risk assessment. *Ocean Engineering*. 2022;250:111006. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111006>.
6. Ahmed, Y. A., et al. (2021). COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;9(8):790. <https://doi.org/10.3390/jmse9080790>.
7. Korupoju, A. K., Kapadia, V., Vilwathilakam, A. S., Samanta, A. (2025). Ship Collision Risk Evaluation using AIS and weather data through fuzzy logic and deep learning. *Ocean Engineering*. 2025;318:120116. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120116>.
8. Park, J. (2026). Estimation of Vessel Collision Risk Under Uncertainty Using Interval Type-2 Fuzzy Inference Systems and Dempster–Shafer Evidence Theory. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2026;14(1):34. <https://doi.org/10.3390/jmse14010034>.

9. Zhou, Y., Daamen, W., Vellinga, T., Hoogendoorn, S. P. (2020). Impacts of wind and current on ship behavior in ports and waterways: A quantitative analysis based on AIS data. *Ocean Engineering*. 2020;213:107774. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107774>.
10. Hansen, P. N., Enevoldsen, T. T., Papageorgiou, D., Blanke, M. (2022). Autonomous Navigation in Confined Waters – A COLREGs Rule 9 Compliant Framework. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(31):222–228. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.435>.
11. Sawada, R., Sato, K., Minami, M. (2024). Framework of safety evaluation and scenarios for automatic collision avoidance algorithm. *Ocean Engineering*. 2024;300:117506. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117506>.
12. Shi, Z., Zhen, R., Liu, J. (2022). Fuzzy logic-based modeling method for regional multi-ship collision risk assessment considering impacts of ship crossing angle and navigational environment. *Ocean Engineering*. 2022;111847. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111847>.
13. Zhao, L., Fu, X. (2021). A novel index for real-time ship collision risk assessment based on velocity obstacle considering dimension data from AIS. *Ocean Engineering*. 2021;240:109913. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109913>.
14. Gai, X., Zhang, Q., Hu, Y., Wang, G. (2024). A Fuzzy Fusion Method for Multi-Ship Collision Avoidance Decision-Making with Merchant and Fishing Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024;12(10):1822. <https://doi.org/10.3390/jmse12101822>.
15. Szlapczynski, R., Szlapczynska, J. (2021). A ship domain-based model of collision risk for near-miss detection and Collision Alert Systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;214:107766. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107766>.
16. Cheng, K., et al. (2025). A novel fuzzy comprehensive evaluation method for ship collision risk. *Ocean Engineering*. 2025;332:121462. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121462>.
17. Yuan, X., Zhang, D., Zhang, J., Zhang, M., Guedes Soares, C. (2021). A novel real-time collision risk awareness method based on velocity obstacle considering uncertainties in ship dynamics. *Ocean Engineering*. 2021;220:108436. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108436>.
18. <https://github.com/lpelykhivskyi/mass-collision-risk-simulation>.

Ben A. P., Pelykhivskyi L. O., Voronenko S. V. A COLLISION RISK ASSESSMENT MODEL FOR AUTONOMOUS SURFACE VESSELS CONSIDERING ENVIRONMENTAL INFLUENCES

The article is devoted to the development of a fuzzy logic-based model for assessing the collision risk of autonomous surface vessels under conditions of environmental uncertainty. The current state of development of collision avoidance systems for autonomous vessels is considered, and the key challenges associated with the processing of incomplete and imprecise navigational data are identified. A comparative analysis of existing approaches to collision risk assessment is carried out, in particular methods based on the distance and time to the closest point of approach (DCPA/TCPA) and fuzzy logic, with their advantages and limitations determined. A conceptual fuzzy logic-based model for ship collision risk assessment is proposed, providing a comprehensive evaluation of the risk level by taking into account the geometric parameters of the encounter area, the influence of environmental factors, and the uncertainty index of navigational information. A distinctive feature of the proposed model is the separation of geometric and contextual risk components, as well as the use of a two-layer fuzzy inference system that takes into account the constraints of COLREGs-72. It is shown that the integration of fuzzy logic methods, multi-criteria analysis, and new approaches to modeling environmental uncertainty can improve the reliability of risk assessment under real operating conditions of autonomous vessels. The structure of the developed risk assessment system is presented, its operation is demonstrated using typical ship encounter scenarios, and the degree of influence of external factors, including wind, current, and sea state, on the formation of the risk level is determined. Directions for further research are identified, in particular the use of fuzzy systems and evidence theory methods to account for the uncertainty of environmental factors affecting the motion control of autonomous vessels.

Key words: fuzzy logic; collision risk assessment; autonomous surface vessels; MASS; DCPA; TCPA; COLREGs; navigational safety; uncertainty; artificial intelligence; control systems.

© Бень А. П., Пелихівський Л. О., Вороненко С. В.

Статтю прийнято до редакції 18.05.2026