

## ASPECTS OF DIGITALIZATION OF SHIP COLLISION AVOIDANCE REGULATIONS

### АСПЕКТИ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ПРАВИЛ ЗАПОБІГАННЯ ЗІТКНЕННЯ СУДЕН

L. L. Vagushchenko, DSc, professor, A. J. Kozachenko, senior lecturer

Л. Л. Вагущенко, д.т.н., професор, О. Ю. Козаченко, ст. викладач

National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine

Національний університет «Одеська Морська Академія», Україна

#### ABSTRACT

*The study is devoted to the development of proposals that would allow for a more complete consideration of the requirements for actions to avoid ships in various situations. On the basis of the analysis of methods for ensuring safe avoidance it is established that the most suitable variant of setting safety limits can be considered as target domains. It is noted that when passing by target at long distance, it is necessary to take into account in domain the features of own ship and that target. The first vessel is considered as a point when solving the problems of collision avoidance in this case. When it is necessary to pass by at a short distance, the size of the own ship is not taken into account in the target domains. Own ship is represented as a rectangle with sides equal to her length and width. It is noted that the most appropriate way to prevent collisions with navigational obstacles is to use the boundaries of safe bearing, distances, lanes, depths (isobaths, "no go areas" contours) in onboard collision avoidance systems. These boundaries should be stored in the system memory. An indicator for determining the significance of a change in course or/and speed is proposed. The method is chosen and the duration of maneuver calculation is found with its help, at which the results obtaining will be considered in real time. The necessity to disregard point (b) in COLREGs Rule 14 when automatically determining the type of situations is justified, as its taking into account reduces the number of existing variants of approaching ships with the risk of collision on opposite courses. A refined list of binary situations affecting the choice of maneuvers in free waters in normal visibility is presented. The actions answering the binary situations and not contradicting COLREGs are proposed for power driven ships and vessels with different navigational status in free waters in normal visibility. Eight types of acceptable action zones were identified and prioritized to select maneuvers in the presence of moving and stationary obstacles. The maneuver option is selected in the zone with the highest priority.*

**Keywords:** collision avoidance, domain of danger, binary situations, compliance with COLREGs, zones of acceptable actions

#### **Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Міжнародний інтерес до розвитку морських автономних суден (MASS - Maritime Autonomous Surface Ship) і безпілотних суден, що входять до їхнього складу (USV - Unmanned Surface Vessel), зростає. Однією з важливих проблем створення цих транспортних засобів є забезпечення їм здатності безпечного та ефективного розходження з рухомими і нерухомими перешкодами в різних умовах плавання.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Під час вибору дій для розходження із суднами керуються міжнародними правилами запобігання зіткненням суден (COLREGs - International Regulations for Preventing Collisions at

Sea), місцевими правилами та рекомендаціями доброї морської практики. Одним із важких завдань під час розвитку MASS є переклад вимог COLREGs, які були написані для людей, в алгоритми для автоматичного запобігання зіткненням. Наразі в морській галузі активно обговорюється питання про те, чи потрібно вносити зміни в COLREGs, щоб їх можна було застосувати до MASS, і якщо так, то яким чином.

Огляд основних запропонованих методів для автоматичного розв'язання колізійних ситуацій і результати їхнього аналізу наведено в статтях [6, 8]. У роботі [3] відображено результати формального опису COLREGs у частині маневрування, визначено області взаємних обов'язків суден, ситуації з ризиком надмірного зближення, і способи поведінки. Розглянуто взаємодії в умовах нормальної та зниженої видимості. Встановлено не передбачені COLREGs нестандартні ситуації. У посібнику [9] запропоновано каталог вибору маневру для розходження, що полегшує визначення дій суден з урахуванням COLREGs. Для розв'язання проблеми зіткнення кількох суден у статті [1] запропоновано оригінальний підхід до рішень із максимальною зміною курсу і мінімальною зміною швидкості, який виявився ефективним для розв'язання проблем уникнення зіткнень кількох суден. У статті [2] представлено проблему перетворення знань, що містяться в положеннях COLREGs і хорошої морської практики, для комп'ютерних додатків. Порівнюються і розглядаються деякі методи подання знань для підтримки прийняття рішень у ситуаціях, пов'язаних із запобіганням зіткнень. У роботі [4] представлено тришарову гібридну систему запобігання зіткненням для автономних надводних апаратів, що відповідає правилам 8 і 13-17 COLREGs. Система складається з високорівневого плануючого модуля, що виробляє з урахуванням COLREGs оптимізовану за енергією траєкторію для розходження на основі моделі прогнозуючого управління, та алгоритму короткострокового управління для опрацювання аварійних ситуацій відповідно до COLREGs. У дослідженні [5] подано результати опитування ліцензованих палубних офіцерів про потенційне майбутнє COLREGs у зв'язку із впровадженням MASS. У статті [7] представлено підхід до навігації суден, що відповідає вимогам COLREGs. Запропоновано архітектуру системи, яку буде реалізовано і протестовано на тренажерах і на ходових випробуваннях із використанням автономного безпілотного надводного судна. Приділяється увага програмному забезпеченню для запобігання зіткненням і зниження ризиків, пов'язаних із цим. У першій частині дослідження [10] розглядається концепція інтелектуального цифрового рульового для управління рухом суден майбутнього. У другій частині цієї роботи розглядається система запобігання зіткненням, заснована на нечіткій логіці, розроблена для підтримки цифрового рульового. У третій частині досліджується ступінь відповідності рішень людини і системи в критичних ситуаціях з метою виявлення можливих відмов цифрового рульового в модельованому середовищі. У роботі [11] на практичних прикладах проведено попередній аналіз застосовності нечіткої логіки як інструменту для алгоритмічної інтерпретації COLREGs. У роботі [12] дано огляд літератури, присвячений системам попередження зіткнень на морі з метою перевірки їхньої відповідності COLREGs у всіх ситуаціях, згаданих у цих правилах. Виявлено недоліки та запропоновано рішення. У статті [13] характеризуються результати завершення компанією Rolls-Royce проекту MAXCMAS (MACHine eXecutable Collision regulations for Marine Autonomous Systems). Ключові правила COLREGs і хорошої морської практики під час виконання цього проекту було формалізовано, і отримані алгоритми апробовано під час оцінювання ситуацій і вибору маневрів. У роботі [14] обговорено і критично проаналізовано основні методи урахування COLREGs, запропоновані для використання в системах запобігання зіткненням.

Результати досліджень показують, що під час застосування COLREGs, місцевих правил і рекомендацій доброї морської практики до MASS існує низка перешкод, які потребують чіткішого визначення деяких термінів, понять і змін у нормативних документах. Ця робота ускладнюється тим, що COLREGs, на думку більшості фахівців, не повинні мати кількісного вираження, щоб бути універсальними і компактними. Завдання вироблення цифрових значень параметрів розходження для різних умов плавання, таким чином, покладається на систему. Запропоновані методи для автономного вирішення колізійних ситуацій мають свої недоліки

та позитивні сторони. Єдиної думки щодо методів та алгоритмів попередження зіткнень для автономних суден поки що не вироблено. Тому дослідження, результати яких дадуть змогу більш повно та ефективно врахувати комплекс вимог до розходження автономних суден з пілотованими та автономними суднами, є актуальними.

### **Формулювання мети дослідження (постановка задачі)**

Мета роботи – вироблення пропозицій, що дають змогу з більшою повнотою враховувати вимоги, що висувуються до дій для розходження із суднами в різних ситуаціях.

Під час дослідження передбачалося, що інформація про цілі та навігаційну обстановку надходить від радара, GNSS, AIC і ECDIS.

Правила, на які даються посилання в тексті, входять до COLREGs.

### **Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів**

Нижче використано такі скорочення: OS – власне судно (own ship); TS – ціль (target ship); CPA – точка найкоротшого зближення (closest point of approach); DCPA – відстань найкоротшого зближення (distance at CPA); TCPA – час найкоротшого зближення (time to CPA); GWV – судно, що поступається дорогою (give-way vessel); SOV – судно, якому поступаються дорогою (stand-on vessel); nm – морська миля (nautical mile). Для позначення OS і небезпечної цілі також використовувалися символи А і В. Виділяли такі види зовнішнього середовища суден А і В, що зближуються з ризиком зіткнення: вільне; пасивне; активне та змішане. У вільному середовищі немає об'єктів, що впливають на дії суден А і В. В інших середовищах на дії цих суден впливають відповідно: навігаційні перешкоди, інші судна; навігаційні перешкоди та інші судна. За кількістю суден, що беруть участь у розходженні, виокремлюють бінарні (парні) ситуації (two-vessel situations) і ситуації з кількома суднами (multi-vessel situations).

Дії суден для уникнення зіткнення повинні відповідати COLREGs, місцевим правилам і доброї морської практики з безпеки, своєчасності, економічності, легкості виявлення, приписуваної або рекомендованої поведінці. Ці дії потрібно визначати в реальному часі з урахуванням динаміки OS.

**Безпека дій.** Як показник безпеки зазвичай використовують DCPA (позначимо  $\delta$ ) між корпусами суден. Коли вона більша за певну межу (позначимо  $\delta^*$ ), розходження вважається безпечним. Основними факторами, що впливають на таку межу, є:

- тип району плавання і щільність руху в ньому (обмеженість акваторії нерухомими і рухомими перешкодами);
- особливості (розміри, маневреність, швидкість) OS і TS;
- умови видимості;
- похибки визначення положення і параметрів руху TS.

Аналіз показує, що найбільш відповідним варіантом для завдання меж безпеки під час розходження можна вважати домени цілей - оточуючі TS області, в які судноводій не хоче потрапляння свого судна. Такі домени дають змогу враховувати більшу небезпеку перетину курсу цілі по носі, ніж по кормі. Можна виділити два варіанти використання доменів цілей. У першому при їх утворенні враховуються особливості (розміри, маневреність, швидкість) OS і TS, а OS під час розв'язання задач розходження уявляється точкою - центром ваги. Це спрощує пошук маневрів, оскільки потрібно визначати потрапляння в домен тільки цієї точки (рис. 1,а). Зазвичай такі домени використовують, коли судна розходяться на досить великій дистанції. Поправку на розміри OS у цьому разі приймають рівною половині довжини цього судна. Коли необхідно розходитися на невеликій відстані, розміри OS при утворенні доменів цілей не враховують. У цьому разі OS уявляють прямокутником, зі сторонами, що дорівнюють довжині та ширині OS. На рис. 1,б наведено одну з можливих форм домену з урахуванням тільки розмірів цілі.

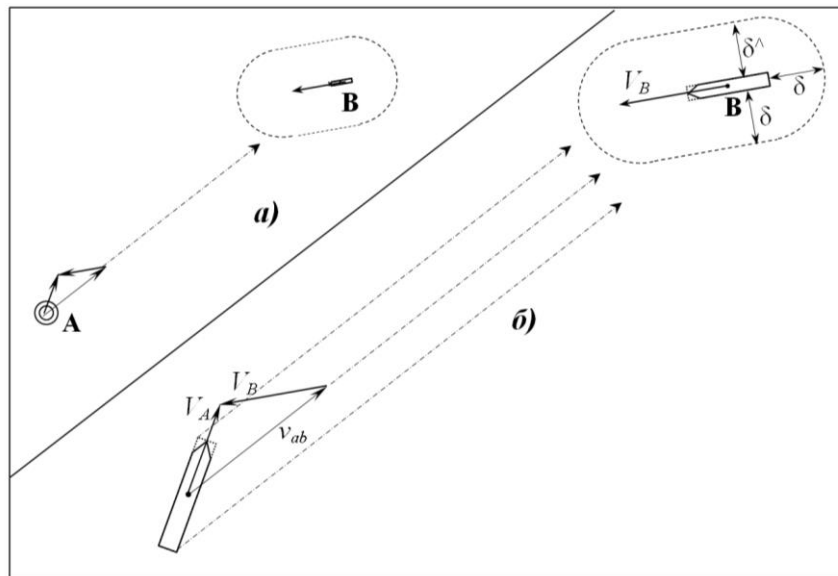


Рис. 1. Два варіанти використання доменів цілей:  $V_A$  і  $V_B$  - швидкості суден  $A$  і  $B$ ;  $v_{ab}$  - швидкість судна  $A$  щодо судна  $B$ .

Задане для розходження значення  $\delta^\wedge$  є показником рівня безпеки цієї операції. У відкритому морі можливо розходження із найвищим рівнем безпеки ( $DCPA \geq 2,0$  nm). У стиснутих водах через обмеженість акваторії нерухожими і рухомими перешкодами розійтися на такій дистанції неможливо. Тому  $\delta^\wedge$  зменшують, до значення, близького до найбільшого, на якому можна розійтися за цих умов, щоб рівень безпеки під час уникнення зіткнення був найвищим. Оскільки під час призначення  $\delta^\wedge$  неможливо передбачити всі чинники, що впливають на расхождення, то можливі випадки відсутності рішення з даним значенням  $\delta^\wedge$  і необхідність його зменшення. Тому крім  $\delta^\wedge$ , доцільно використовувати й мінімально допустиме ( $\delta_v$ ) за даних умов DCPA, яке визначає, до якого значення можна зменшувати  $\delta^\wedge$ . Зазначимо, що на глибокій воді відстань, на якій виникає небезпека "присмоктування" під час обгону одним судном іншого на паралельному курсі, дорівнює  $\delta_v = 2,5B_S$ , де  $B_S$  - ширина найбільшого із суден.

Для запобігання зіткненням із навігаційними перешкодами в CAS доцільно зберігати межі безпечних: пеленгів, відстаней, смуг руху, глибин (ізобата, контури несудохідної області). Два такі елементи представлені на рис. 2 і 3.

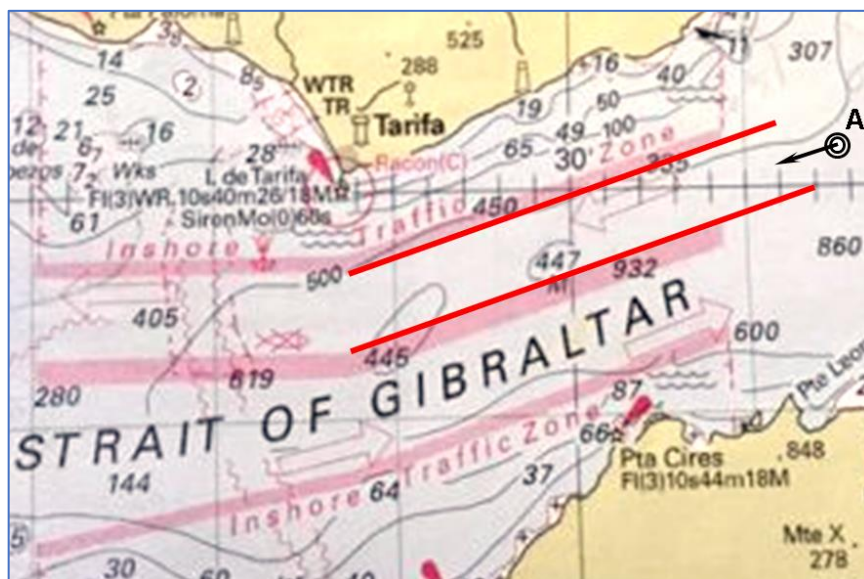


Рис. 2. Виділення безпечної для маневрів смуги лініями червоного кольору

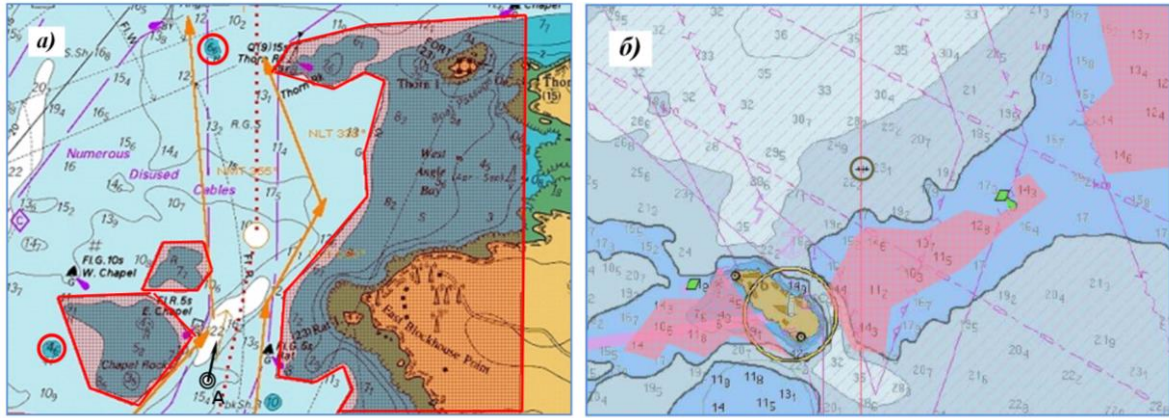


Рис. 3. Виділення несудохідної області: а) колами і багатокутниками з червоними межами, б) колами і криволінійними межами темно-сірого кольору.

**Своєчасність дій.** Виявлення суден, що становлять загрозу, і вибір маневрів розходження зазвичай виконується за допомогою заздалегідь встановлюваних меж ДСРА і ТСРА ( $\delta^{\wedge}$  і  $\tau^{\wedge}$ ), які повинні відповідати умовам плавання. Дистанція між суднами А і В, що відповідає початку урахування Правил 13-19, дорівнює  $D^{\wedge} = \tau^{\wedge} \cdot v_{BA}$ , де  $v_{BA}$  - швидкість судна В щодо судна А. У проміжку часу від моменту початку врахування Правил до моменту найкоротшого зближення цих суден зазвичай виокремлюють три етапи: передбачуваних GWV дій; можливих дій SOV і екстремальних заходів. Судно, що поступається дорогою, зобов'язане вживати дії на першому етапі зближення. Якщо цього не сталося, то тільки на другому етапі може вживати заходів SOV.

Під час обгону, коли відносна швидкість зближення суден мала, може виявитися, що  $D^{\wedge} = \tau^{\wedge} \cdot v_{BA}$  менше за  $\delta^{\wedge}$ . Тобто відстань між суднами вже небезпечна, а враховувати COLREGs ще не треба. Щоб такого не відбувалося, пропонується, коли  $\tau^{\wedge} \cdot v_{BA}$  менше за  $\delta^{\wedge}$ , значення  $\tau^{\wedge}$  коригувати й ухвалювати його таким, що дорівнює  $\tau^{\wedge} = 1,1 \delta^{\wedge} / v_{BA}$ .

**Рішучість дій.** Згідно з Правилами 8 і 16 дія для розходження має бути такою, що легко виявляється іншим судном, тобто досить великою і короткою за часом. Використання для розходження повільних змін курсу і/або швидкості навіть на достатню величину не виправдане. Такі дії можуть сприйматися як послідовні невеликі зміни, яких слід уникати (Правило 8). Для визначення достатньої великої зміни ( $Q$ ) курсу та/або зміни ( $W$ ) швидкості пропонується використовувати величину  $\beta$ :

$$\beta = |Q/q^{\wedge}| + |W/w^{\wedge}|; \quad (1)$$

де  $q^{\wedge}$ ,  $w^{\wedge}$  – межі достатньо великих змін курсу та швидкості.

Зазвичай  $q^{\wedge}$  приймається рівним  $30^{\circ}$ . В умовах обмеженого простору, коли навігаційні перешкоди та інші судна обмежують рух, раціональною може бути менша зміна курсу. Тому доцільно використовувати в алгоритмах розв'язання задач розходження і мінімально допустиму ( $q_v$ ) в цих умовах величину  $Q$ . Найчастіше її приймають  $q_v = 15^{\circ}$ . Однією з рекомендацій для нижніх меж достатньо великих і допустимих значень  $W$  під час уникнення зіткнення зниженням швидкості є  $w^{\wedge} = 0,4 \cdot V_0$  та  $w_v = 0,25 \cdot V_0$ , де  $V_0$  - швидкість до маневру. Межа  $q^{\wedge}$  дорівнює одиниці, тобто дія є достатньо великою, коли  $\beta \geq 1$ . Нижню межу ( $\beta_v$ ) допустимих значень  $\beta$  пропонується знаходити за допомогою виразу  $\beta_v = (q_v/q^{\wedge} + w_v/w^{\wedge})/2$ .

**Економічність дій.** Показником економічності маневру розходження зазвичай слугує величина втрат ходового часу. У них під час маневру курсом включаються втрати через ухилення від наміченого маршруту переходу і повернення до нього. Для маневру швидкістю враховуються втрати ходового часу, що виникають при зменшенні ходу, при русі зниженою швидкістю і при її збільшенні до початкового значення. Економічність маневру оцінюється також і величиною додаткової витрати палива.

**Врахування динаміки судна під час вибору маневрів.** Морські судна є крупними динамічними об'єктами, що мають велику інерцію, яка проявляється під час маневрування. Нехтування цією обставиною під час планування дій для запобігання зіткненням може призвести до великих похибок у результатах прогнозування і вплинути на безпеку розходження. Найточнішим засобом для прогнозу процесів маневрування є різницеві моделі - процедури чисельного із заданим кроком інтегрування моделі руху судна у вигляді взаємопов'язаної системи нелінійних диференціальних рівнянь, що описують динаміку судна з урахуванням управляючих та збурювальних впливів. Ці засоби дають змогу адекватно моделювати як слабкі, так і сильні маневри суден у прискореному у 600÷1000 разів часі. Однак навіть такої швидкодії поки що виявляється недостатньо для визначення маневру в реальному часі шляхом чисельного аналізу його можливих варіантів. В автономних суднах завдання прогнозування маневрів істотно спрощується, оскільки створювані для них системи автоматичного управління курсом і швидкістю матимуть режими програмної зміни параметрів руху. Функції таких змін можуть використовуватися як прості кінематичні моделі для прогнозу анти-колізійних дій, що дасть змогу в реальному часі знаходити оптимальні варіанти маневрів розходження серед їхніх можливих варіантів.

**Розрахунок параметрів маневрів у реальному часі.** Щоб реакція судна на появу небезпеки зіткнення була своєчасною, алгоритм розрахунку параметрів маневру ухилення має забезпечувати одержання результатів у режимі реального часу, тобто в межах досить малого проміжку часу, який залежить від швидкості зближення суден. Звісно, для того, щоб судити, чи отримуються рішення в реальному часі, цей проміжок має бути відомий. Для його визначення під час розв'язання задач розходження було обрано підхід, який використовують під час розрахунку цього проміжку під час знаходжень місця рухомого об'єкта, де обмеження на час розрахунку беруть таким, щоб відстань, яку об'єкт проходить за цей час, не перевищувала подвоєну похибку визначення місця.

Результати розв'язання задач розходження на маневреному планшеті вважаються задовільними, і похибку, з якою відкладаються відстані на маневреному планшеті (0,1 nm), можна вважати допустимою. Тому обмеження на час розрахунку параметрів маневру брали таким, щоб за максимально можливої швидкості зближення відстань між суднами не зменшувалася більше за подвоєну похибку, з якою відкладаються відстані на маневреному планшеті. Для не швидкісних суден швидкість зближення не може бути більшою за 60 вузлів. З огляду на це і похибку у відстані 0,1 nm, можна встановити, що для звичайних за швидкістю суден час розрахунку параметрів маневру не має перевищувати 12 с.

**Дії у вільному зовнішньому середовищі в бінарних ситуаціях.** У COLREGs визначено, що в одних ситуаціях (Правило 13 - обгін, Правило 15 - перетин курсів, Правило 18 - взаємні обов'язки суден) одне судно повинно діяти у визначений спосіб, а інше зберігати курс і швидкість. В інших випадках (Правило 14 - прямо одне на одного, Правило 19 - плавання за обмеженої видимості) вживати заходів зобов'язані обидва судна. Судно, яке при виникненні небезпеки зіткнення повинно змінювати параметри свого руху, називають таким, що поступається дорогою (GWV). Зобов'язане зберігати курс і швидкість судно називається судном, якому поступаються дорогою (SOV). Залежно від рівня небезпеки зіткнення виділяють нормальні, напружені та екстремальні ситуації. Нормальні ситуації належать до етапу зближення суден, на якому дії для розходження вважаються завчасними. Напружені ситуації є наслідком неприйняття дій судном, що поступається дорогою, або помилкових рішень одного чи обох суден. До екстремальних належать ситуації, коли судна перебувають настільки близько одне до одного, що зіткнення можна уникнути тільки максимально сильним маневром одного судна або діями обох суден. Правилами 13-19 визначаються дії суден у нормальних і напружених бінарних ситуаціях.

Під час регламентування дій для розходження використовувався ситуаційний підхід. У його основі лежить чітке визначення ситуацій, що впливають на вибір дій, і відповідних цим ситуаціям вказівок. Аналіз COLREGs показує, що ситуація зближення суден, що йдуть прямо одне на одного, визначена недостатньо чітко, і не всі ситуації, що впливають на вибір дій, враховані. Згідно з COLREGs ситуація зближення суден, що йдуть прямо одне на одне, має вважатися існуючою (Правило 14, пункт b), коли судно бачить інше судно прямо або майже прямо за курсом, і при цьому вночі воно може бачити в створі або майже в створі топові вогні і (або) обидва бортові вогні іншого судна, а вдень воно спостерігає його відповідний ракурс. У такому разі (рис. 4,а), якщо є течія, то відносно води судна рухаються назустріч одне одному, а відносно ґрунту - курсами, що перетинаються. З появою супутникових систем навігації рух суден враховується відносно ґрунту, як в обмежених водах, так і у відкритому морі, що визначає доцільність вважати під час визначення цієї ситуації протилежними курси відносно ґрунту. Але в цьому разі за істотної течії обидва бортових вогні іншого судна не буде видно (рис. 4,б). Інша розбіжність характеризується на рис. 4,в, на якому межа небезпечних відстаней найкоротшого зближення суден 2,2 nm, Тут судно А має судно В на своєму правому боці, ситуація із загрозою зіткнення, але за наведеним у Правилі 14 визначенням не стосується ні суден, які рухаються по пересічних курсах, ні суден, що йдуть прямо одне на одного. Тому пропонується під час автоматичного визначення виду ситуації зближення на автономних суднах пункт (b) у Правилі 14 не враховувати.

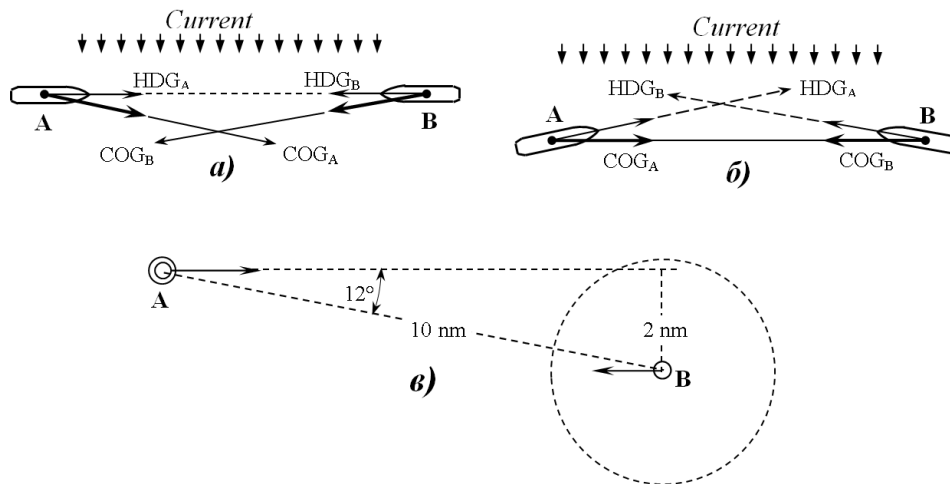


Рис. 4. До визначення ситуації зближення суден, що йдуть прямо одне на одного. HDG - напрям лінії кіля в бік носа судна (heading); COG - швидкість щодо ґрунту (course over ground)

Аналіз також показує, що не всі бінарні ситуації, які впливають на вибір дій, представлені в COLREGs. На практиці під час виникнення небезпеки зіткнення в ситуації обгону судноводії зазвичай обирають дію залежно від диспозиції суден (курсний кут SOV правого борту; курсний кут SOV лівого борту, співпадаючі курси). Тільки за співпадаючих курсів вважається, що обгін іншого судна по правому і лівому борту є рівноцінним за ефективністю. Коли курси GWV і SOV у ситуації обгону перетинаються, такої рівнозначності немає. Покажемо це на простому прикладі, в якому судно А обганяє судно В. Параметри руху і взаємного розташування цих суден наведено в табл. 1, де  $L$ ,  $K$ ,  $V$  - довжина, курс і швидкість судна, а  $\Pi$ ,  $D$  - пеленг на судно В і дистанція до нього, визначені на судні А.

Таблиця 1. Параметри руху і взаємного розташування суден

Судно	$L$ , метри	$K$ , градуси	$V$ , вузли	$\Pi$ , градуси	$D$ , милі
А	220	0	17,0	-	-
В	250	334	11,9	36	2,54

Порівнюються в прикладі варіанти обгону судна В правим (рис. 5,а) і лівим (рис. 5,б) бортом шляхом зміщення судна А під кутом  $30^\circ$  на паралельну початковій лінії шляху, під час слідування якою судно А пройде повз судно В на заданій відстані найкоротшого зближення  $0,7 \text{ nm}$ .

Під час розрахунку отримуємо, що для досягнення цієї мети потрібен зсув  $\text{XTD}=0,6 \text{ nm}$  судна А вправо від лінії шляху, а вліво -  $\text{XTD}=1,44 \text{ nm}$ . Втрата ходового часу з урахуванням повернення судна А на вихідну лінію шляху під кутом  $20^\circ$  у першому випадку дорівнює  $1,1 \text{ min}$ , а в другому -  $2,8 \text{ min}$ . Сам маневр зміщення в першому випадку займає в два з половиною рази менше часу, ніж у другому.

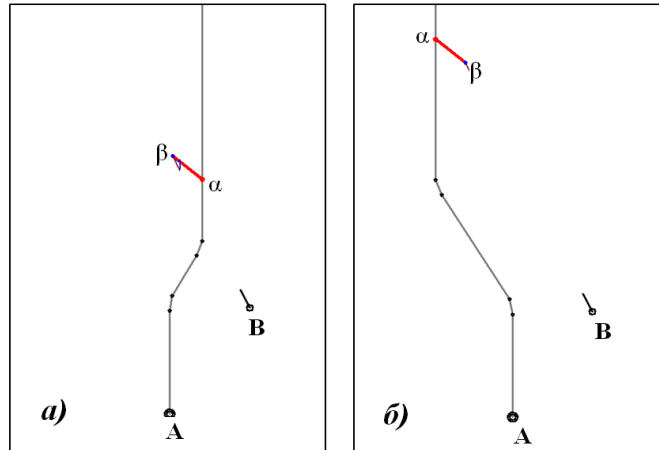


Рис. 5. Обгін судном А судна В:  $\alpha, \beta$  - положення суден А і В у момент найкоротшого зближення

Курси суден можна вважати співпадаючими, коли вони відрізняються один від одного не більше, ніж на 3 градуси. Діапазони пересічних курсів під час обгону залежать від співвідношення швидкостей суден. Розраховану для низки значень  $V_A/V_B$  можливу максимальну відмінність ( $\Delta$ ) між курсами суден А і В наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Максимальна різниця між курсами суден під час обгону залежно від  $V_A/V_B$

$V_A/V_B$	1,1	1,25	1,5	1,75	2,0
$\Delta^\circ$	10	20	30	36	40

Оскільки диспозиція суден під час обгону впливає на вибір дій, то три її типи слід внести до числа ситуацій для ухвалення рішень. У результаті, класифікацію ситуацій, що впливають на вибір дій двох суден (за винятком вітрильних) у разі появи небезпеки зіткнення у вільних водах за нормальної та обмеженої видимості, можна подати у вигляді (рис. 6).

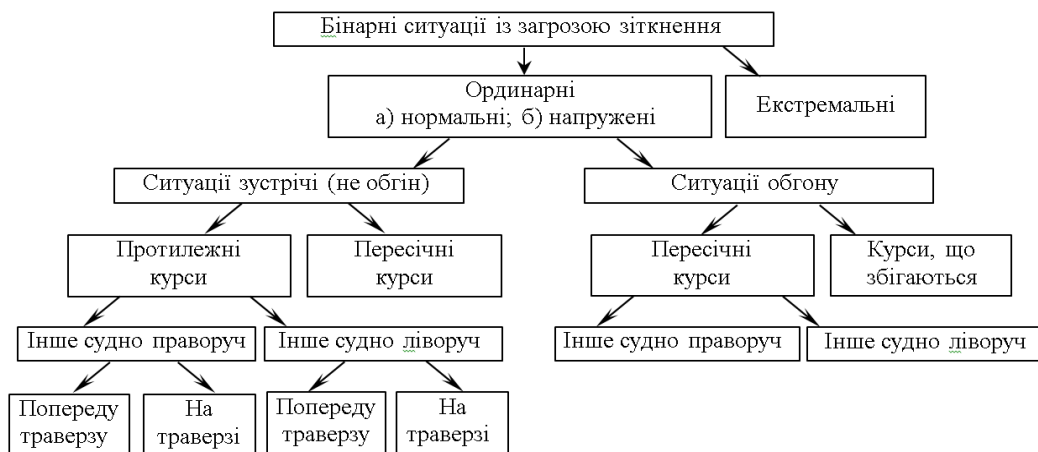


Рис. 6. Класифікація ситуацій зближення двох суден



Регламентовані для різних бінарних ситуацій у вільному зовнішньому середовищі рішення (сторона повороту, дії) нижче називаються стандартними.

У вільних водах за нормальної видимості GWV зазвичай намагається без зміни швидкості мінімізувати втрату ходового часу й уникнути пересечення курсу іншого судна по носі. Дію, яку в напружених ситуаціях може здійснити SOV, обирають такою, щоб забезпечити безпеку як під час виконання іншим судном регламентованих дій, так і за їх відсутності. З урахуванням сказаного, для вільних вод, нормальної видимості, суден з механічним двигуном і суден з різним навігаційним статусом було визначено стандартну сторону ухилення, для уникнення зіткнення:

- у ситуаціях зустрічі на протилежних курсах стандартною дією GWV є поворот праворуч;
- у ситуаціях, як зустрічі, так і обгону, суден, що йдуть пересічними курсами, стандартна дія GWV - поворот у бік SOV;
- у ситуаціях обгону за співпадаючих курсів стандартна дія GWV - зміна курсу вліво, якщо це судно перебуває зліва від лінії шляху судна, яке обганяють, і вправо, коли воно перебуває праворуч від цієї лінії або на ній.
- у напружених ситуаціях зустрічі на пересічних курсах, коли SOV може виконати маневр розходження, стандартною дією цього судна є поворот у бік, що збігається за назвою зі стандартною стороною ухилення для GWV;
- у напружених ситуаціях обгону, коли SOV може виконати маневр розходження, стандартною дією цього судна вважається поворот у бік, різнойменний зі стандартною стороною ухилення для GWV.

Для обмеженої видимості стандартна сторона ухилення від іншого судна встановлена Правилем 19. В основу її приписання покладено вимогу "сприяння" суден одне одному. Виконання цієї вимоги допомагає швидко збільшити дистанцію між суднами. У Правилі 19 не встановлено сторону ухилення в ситуації, подібній до ситуації, коли інше судно за нормальної видимості є таким, що обганяється. Виходячи з вимоги "сприяння", у цьому разі судно, що перебуває позаду траверзу іншого судна, має змінити курс у бік, протилежний стороні знаходження іншого судна.

Вважали, що індекс ( $\beta$ ) повороту під час зміни курсу в стандартний бік дорівнює одиниці ( $\beta=1$ ), під час ухилення в протилежний бік -  $\beta=-1$ , а під час зміни тільки швидкості -  $\beta=0$ .

**Дії в обмежених водах.** У ситуаціях з декількома суднами дію визначають стосовно найнебезпечнішого з них, і вибирають безпечної стосовно всіх нерухомих і рухомих перешкодах. За нормальної видимості наведені положення для розходження у вільному зовнішньому середовищі мають застосовуватися і для обмежених акваторій, коли дозволяють обставини. Для інших випадків використовуються альтернативні стандартним варіанти дій. Оскільки в Правилах регламентується сторона ухилення, то поворот у стандартний бік, зміна швидкості, поворот у стандартний бік зі зміною швидкості є кращими діями по відношенню до повороту в протилежний бік без зміни або зі зміною швидкості. Другі дії застосовуються, коли варіантів пріоритетних дій немає.

У області допустимих варіантів дій виокремлювали основну й альтернативні множини. Перша множина містить варіанти дій, що задовольняють вимогам до розходження. До альтернативних множин належали допустимі варіанти дій, які не відповідають вимогам, що висуваються, за величиною ( $\beta_v \leq \beta \leq \beta^{\wedge}$ ) та/або за стороною ухилення ( $\sigma = -1$ ) та/або за безпекою ( $\delta_v \leq \delta_m \leq \delta^{\wedge}$ ), де  $\delta_m$  - мінімальне серед DCPA цілей на шляху OS. Коли ( $\beta < \beta_v$ ) або ( $\delta_m < \delta_v$ ), дія вважалася неприпустимою. Основні варіанти дій позначалися як АСТ{0}. У позначенні альтернативного варіанта у фігурних дужках наводяться параметри, значення яких не відповідають вимогам, наприклад, АСТ{ $\delta, \beta$ }. У табл. 3 наведено в порядку пріоритету застосування зони  $Z_h$  дій, де  $h=1, 2, \dots, 9$  - індекс пріоритету. У загальному випадку для розходження дія повинна вибиратися в зоні з найвищим пріоритетом.

Таблиця 3 - Множини допустимих маневрів

Зона	Вид маневру
$Z_1$	АСТ{0}
$Z_2$	АСТ { $\beta$ }
$Z_3$	АСТ { $\delta$ }
$Z_4$	АСТ { $\delta, \beta$ }
$Z_5$	АСТ { $\zeta$ }
$Z_6$	АСТ { $\zeta, \beta$ }
$Z_7$	АСТ { $\zeta, \delta$ }
$Z_8$	АСТ { $\zeta, \delta, \beta$ }
$Z_9$	Неприпустимий

Правилом 8 вимагається, щоб ефективність дії, що вживається для запобігання зіткненню з іншим судном, повинна ретельно контролюватися доти, доки інше судно не буде остаточно пройдено і залишене позаду. Тому в процесі маневрування доцільно через малий інтервал часу знаходити, з урахуванням одержуваної інформації, майбутні мінімальні відстані між ОС і цілями. У разі появи обставин, що впливають на безпеку виконуваного маневру (нових цілей, дій відстежуваних цілей, ...), параметри маневру коригуються.

### Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Під час виконання роботи було вироблено такі пропозиції, що дають змогу з більшою повнотою враховувати вимоги, які висуваються до дій для розходження із суднами:

- запропоновано показник для визначення суттєвості зміни курсу разом зі швидкістю;
- обрано спосіб і визначено за його допомогою тривалість розрахунку маневру, за якої отримання результатів вважатиметься в режимі реального часу;
- наголошено на необхідності під час автоматичного визначення виду ситуації розходження пункт (b) у Правилі 14 не брати до уваги, тому що його врахування зменшує безліч наявних варіантів зближення суден з ризиком зіткнення на протилежних курсах;
- представлено уточнений перелік бінарних ситуацій, що впливають на вибір маневрів у вільних водах за нормальної видимості;
- запропоновано дії, що не суперечать COLREGs і відповідають бінарним ситуаціям, для розходження суден з механічним двигуном і з різним навігаційним статусом у вільних водах за нормальної видимості;
- виділено й упорядковано за пріоритетом області можливих дій для розходження за наявності рухомих і нерухомих перешкод.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Ahmed, Y.A.; Hannan, M.A.; Oraby, M.Y.; Maimun, A. COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. J. Mar. Sci. Eng. 9, 2021, 790.
2. Banaś P., Breitsprecher M.: Knowledge Base in the Interpretation Process of the Collision Regulations at Sea. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 5, No. 3, 2011. 359-364,
3. Цымбал Н.Н., Бужбецкий Р.Ю. Формализация МППСС-72 в части координации взаимодействия судов при расхождении. Судовождение. № 12. 2006. 124 129.
4. Eriksen B-OH, Bitar G, Breivik M and Lekkas A.M/ Hybrid Collision Avoidance for ASVs Compliant With COLREGs Rules 8 and 13–17. Front. Robot. AI 7:11. 2020.

5. Hannaford, E., Maes, P. & Van Hassel, E. Autonomous ships and the collision avoidance regulations: a licensed deck officer survey. *WMU J Marit Affairs* 21, 2022. 233–266.
6. Huang, Y., Chen, L., Chen, P., Negenborn, R. R., & van Gelder, P. H. A. J. M. Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. *Safety Science*, 121, 2020. 451–473.
7. Jesús A. García Maza, Reyes Poo Argüelles. COLREGs and their application in collision avoidance algorithms: A critical analysis. *Ocean Engineering* 261. 112029, 2022. 1-14.
8. Lazarowska, A. Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing. *Remote Sens.* 13, 2021. 3265.
9. Мальцев А.С., Тюпиков Е.Е., Ворохобин И.И. Маневрирование судов при расхождении. Одесса: Морской тренажерный центр, 2013, 304 с.
10. Perera L. P., Batalden B. M. Possible COLREGs Failures under Digital Helmsman of Autonomous Ships. *OCEANS - Marseille, France, 2019*.1-7.
11. Pietrzykowski Z., Malujda R. Applicability of fuzzy logic to the COLREG rules interpretation. *Scientific Journals. Maritime University of Szczecin.* 30(102). 2012. 109–114.
12. Salous M., Hahn A., Denker C. COLREGs-Coverage in Collision Avoidance Approaches: Review and Identification of Solutions. 12th International Symposium on Integrated Ship's Information Systems & Marine Traffic Engineering Conference. Hamburg. 2016. 1-10.
13. Varas J. M., Hirdaris S., Smith R., Scialla P., Caharija W., Bhuiyan Z., Mills T., Naeem W., Hu L., Renton I., Motson D., Rajabally E. MAXCMAS Project - Autonomous COLREGs Compliant Ship Navigation. 16th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. - Cardiff, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, - 2017. 454-465.
14. Wróbel K., Gil M., Huang Y., Wawruch R. The Vagueness of COLREG versus Collision Avoidance Techniques. - A Discussion on the Current State and Future Challenges Concerning the Operation of Autonomous Ships. *Sustainability.* 14, 2022, 16516.

## REFERENCES

1. Ahmed, Y.A.; Hannan, M.A.; Oraby, M.Y.; Maimun, A. COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. *J. Mar. Sci. Eng.* 9, 2021, 790.
2. Banaś P., Breitsprecher M.: Knowledge Base in the Interpretation Process of the Collision Regulations at Sea. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 5, No. 3, 2011. 359-364,
3. Cymbal N.N., Buzbeckiy R.Y. Formalization of COLREGs in terms of coordination of ship-to-ship interaction when evading. *Navigation.* № 12: 2006. 124 – 129.
4. Eriksen B-OH, Bitar G, Breivik M and Lekkas A.M/ Hybrid Collision Avoidance for ASVs Compliant With COLREGs Rules 8 and 13–17. *Front. Robot. AI* 7:11. 2020.
5. Hannaford, E., Maes, P. & Van Hassel, E. Autonomous ships and the collision avoidance regulations: a licensed deck officer survey. *WMU J Marit Affairs* 21, 2022. 233–266.
6. Huang, Y., Chen, L., Chen, P., Negenborn, R. R., & van Gelder, P. H. A. J. M. Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. *Safety Science*, 121, 2020. 451–473.
7. Jesús A. García Maza, Reyes Poo Argüelles. COLREGs and their application in collision avoidance algorithms: A critical analysis. *Ocean Engineering* 261. 112029, 2022. 1-14.
8. Lazarowska, A. Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing. *Remote Sens.* 13, 2021. 3265.

9. Malcev A.C., Tjupikov E.E., Vorohobin I.I. Vessel maneuvering at evading/ Morskoy trenazerniy centr, Odessa. 2013, 304 p.
10. Perera L. P., Batalden B. M. Possible COLREGs Failures under Digital Helmsman of Autonomous Ships. *OCEANS - Marseille, France, 2019*, pp. 1-7.
11. Pietrzykowski Z., Malujda R. Applicability of fuzzy logic to the COLREG rules interpretation. *Scientific Journals. Maritime University of Szczecin*. 30(102). 2012. Pp. 109–114.
12. Salous M., Hahn A., Denker C. COLREGs-Coverage in Collision Avoidance Approaches: Review and Identification of Solutions. 12th International Symposium on Integrated Ship's Information Systems & Marine Traffic Engineering Conference. Hamburg. 2016. Pp. 1-10.
13. Varas J. M., Hirdaris S., Smith R., Scialla P., Caharija W., Bhuiyan Z., Mills T., Naeem W., Hu L., Renton I., Motson D., Rajabally E. MAXCMAS Project - Autonomous COLREGs Compliant Ship Navigation. 16th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. - Cardiff, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, - 2017. Pp. 454-465.
14. Wróbel K., Gil M., Huang Y., Wawruch R. The Vagueness of COLREG versus Collision Avoidance Techniques. - A Discussion on the Current State and Future Challenges Concerning the Operation of Autonomous Ships. *Sustainability*. 14, 2022, 16516.