

A METHOD FOR FORMALIZING THE DECISION-MAKING PROCESS FOR PREVENTING DANGEROUS SITUATIONS IN THE E-NAVIGATION SYSTEM

МЕТОД ФОРМАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ЩОДО ЗАПОБІГАННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ СИТУАЦІЙ В СИСТЕМІ E-NAVIGATION

O. Levchenko, PhD., associate professor

О.В. Левченко, к.е.н., доцент

State University of Infrastructure and Technologies, Ukraine

Державний університет інфраструктури та технологій, Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Україна

ABSTRACT

The study aims to improve the safety of ship traffic by improving the methods of formalizing the decision-making process for preventing dangerous situations in a single e-navigation concept. The goal is achieved by a clear statement of the problem and the choice of appropriate approaches to its solution. The main stages of the decision-making cycle performed by the navigator in collision prevention are analysed. Particular attention is paid to the operations performed at the decision-making stage on the further movement of the vessel. The ship's movement plan is described by models of elementary behaviour, each of which consists of elementary actions represented by a set of fuzzy logic rules for performing a certain subtask. The structure of a system that implements the behavioural approach to decision-making by a navigator is proposed. Emphasis is placed on the need to coordinate vessels when deciding to plan a route based on models of elementary behaviours, and a method for coordinating the planning of the vessel's trajectory is developed. The sequence of stages of the method for coordinating the planning of the ship's trajectory is performed cyclically until the target point of the route is reached. At each stage of the vessel's movement, the navigation obstacles and other vessels entering the area of interest of the navigator are monitored and potential hazards from them are identified. A method for tracing the vessel's movement and existing vessels in the navigator's interest area has been developed, which allows for predicting the location at subsequent moments and identifying the coordinates of the conflict site where a situation of dangerous proximity occurs. To formalize the areas dangerous for vessel traffic, a method for generating a map of navigational hazards and conflict situations in the navigator's interest area has been developed, based on a modified method of potential fields. To formally describe the space, only the concept of a potential function is used to represent the space as a matrix of values. The most significant scientific result is the proposed approach to solving the problem of supporting the decision-making of a navigator based on a combination of methods using fuzzy logic and allowed domains, which allows obtaining options for actions that ensure the safety of ship movement in a dangerous situation.

Keywords: ship, navigator, collision, navigation situation, navigation systems, e-navigation, tracing method, navigation hazard, navigation hazard map

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Ситуація надмірного (небезпечного, аварійного) зближення [1] суден виникає в результаті конфлікту маршрутів руху, що викликано порушенням норм та правил судноводіння. Основними причинами виникнення ситуацій надмірного зближення (зіткнення) суден є:

- похибки контролю за вимірюваннями переміщення «цілей»;
- варіація зовнішніх умов;
- нечіткість певних рекомендацій, прописаних у МПЗЗС-72;
- наявність обмежень та ознак, що не є суворо детермінованими;
- неможливість абсолютно точного передбачення намірів інших суден та існуюча ймовірність їх хибних дій.

Положення судна на прогнозованому відрізку часу описується найімовірнішою траєкторією руху. Невизначеність прогнозованого положення судна компенсується зменшенням часового відрізка прогнозу та враховується у розмірах зон безпеки. Виявлення конфлікту проводиться за поточною траєкторною інформацією та на основі гіпотези про прогнозований рух судна. При визначенні ситуації надмірного зближення для пари суден враховуються дистанція безпечного (допустимого) розходження та межі за часом зближення. Ситуація надмірного зближення виникає, якщо виконуються умови:

$$\begin{cases} D_{ij}^{kp} \leq d_{ij}^s; \\ 0 \leq T_{ij}^{kp} \leq t_{bord}, \end{cases} \quad (1)$$

де d_{ij}^s – дистанція безпечного (допустимого) розходження з j -им судном;

t_{bord} – час до небезпечного зближення;

D_{ij}^{kp} – дистанція найкоротшого зближення;

T_{ij}^{kp} – час найкоротшого зближення.

Величина дистанції безпечного (допустимого) розходження розраховується за найменшою відстанню між суднами, яка порівнюється із розмірами зони безпеки. Час до небезпечного зближення враховує резерв часу до порушення меж зони безпеки. Чим більше часу залишається до прогнозованого порушення, тим меншу загрозу воно становить. Для прогнозування конфліктних ситуацій з навігаційною небезпекою (мілководдя, рифи, складні метеоумови природні або штучні об'єкти на морі тощо) також застосовується даний підхід.

Ситуація, при якій траєкторія руху судна на заданій глибині прогнозу перетинає геометричний район водного простору, що описує навігаційну небезпеку, називається небезпечною ситуацією зближення (зіткнення) з навігаційною небезпекою.

Методи вирішення конфлікту призначені для вироблення рекомендацій судноводієві щодо маневру судна в умовах прогнозованого виникнення небезпечної ситуації зближення з іншим судном або навігаційною небезпекою. Основним у методах є побудова такої рекомендованої траєкторії руху судна, яка б не порушувала зони безпеки інших суден або не перетинала район навігаційної небезпеки. Такий підхід зумовлений тим, що під час виконання маневру ухилення судно може зблизитися з третім об'єктом (судном, навігаційною небезпекою) та створити нову небезпечну ситуацію. Отже, метод вирішуватиме множинний конфлікт, зумовлений не тільки безпосередньо цими двома об'єктами, а більшою кількістю об'єктів, що можуть потрапити у зону небезпеки. Цей ефект «доміно» може негативно позначитися на безпеці руху не тільки даного судна, а й інших об'єктів на морі. Вимога, пов'язана з вирішенням множинного конфлікту, стає більш актуальною в умовах обмежених вод зі складною навігаційною обстановкою.

Крім того, запропонований метод вирішення конфлікту має забезпечувати якомога швидке повернення судна на заплановану траєкторію руху при усуненні небезпеки. Тому вироблені рекомендації щодо запобігання реалізації небезпечної ситуації складаються з порядку виконання маневру ухилення та повернення на планову траєкторію та її подальше витримання після вирішення конфлікту з іншим судном або навігаційною небезпекою.

Можливими маневрами ухилення судна в ситуації надмірного зближення (зіткнення) є такі: зміна напрямку руху судна (маневр курсом), збільшення або зменшення швидкості (маневр швидкістю), комбінований маневр (одночасна зміна курсу та швидкості), циркуляція.

Як правило, для запобігання ситуації зіткнення судноводій може застосовувати маневр курсом або гальмування повним ходом. А ось комбінований маневр, як маневр останнього моменту, не рекомендований через те, що при зменшенні швидкості знижується ефективність руля судна. В інших випадках виконання маневру розходження дозволяє досягти таких цілей [2]:

1. Забезпечення безпеки судна;
2. Відповідності рішень судноводія вимогам МПЗЗС-72;
3. Забезпечення заданої економічності.

Для досягнення цілей маневру розходження застосовують окремі прості дії (маневри) або їх послідовності. Тому зміст рекомендацій щодо маневру складається у такому:

- 1) Розрахувати та видати рекомендації про маневр ухилення від початку до повернення на планову траєкторію.
- 2) Давати тільки поточні рекомендації судноводію, виконання яких забезпечує безпечний рух судна на глибину прогнозу.

Але ситуація надмірного зближення (зіткнення) має характерні особливості. Так, у кожний момент судноводій має обмежену інформацію за глибиною і точністю прогнозу. Судноводію особливо важко прогнозувати наміри та дії інших судноводіїв, особливо в умовах конфлікту траєкторій руху декількох суден. Інформація про рівень небезпеки ситуації безперервно змінюється у часі, що вимагає частого аналізу обстановки, корекції поточних або вироблення нових цілей. Отже, умови реального часу висувають до судноводія вимогу щодо необхідності своєчасно (оперативно) приймати правильні та обґрунтовані рішення. Іншими словами, мова йде про надання рекомендацій та прийняття рішень у темпі оновлення інформації про обстановку.

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

Перспективи е-навігації в судноводінні розглянуті у роботі [2], де описується майбутнє даної системи, пов'язане з постійним технологічним удосконаленням, що робить можливим подальший розвиток стратегії е-навігації як засобу забезпечення безпеки судноплавства.

У роботі [3] система попередження зіткнень суден відносяться до класу нечітких систем, на базі правил МПЗЗС-72. Сукупність нечітких правил забезпечують виключення ризиків зіткнення та безпечно плавання суден у будь-яких умовах.

У роботі [4] розглядаються стандартні підходи для оцінки ситуації небезпечного зближення, засновані на прогнозуванні подальшої ситуації на числених методах розрахунку руху суден.

У статті [5] розглядаються принципи роботи та архітектура розроблюваної автоматизованої системи розходження суден, однією з підсистем якої є підсистема оцінки навігаційної ситуації. Основним завданням, вирішуваним даною підсистемою, є комплексна оцінка поточної навігаційної ситуації, включаючи оцінку небезпеки зіткнення з іншими суднами, виходом на мілководдя тощо.

У більшості сучасних систем управління складними динамічними об'єктами, як зазначається в роботі [5], для формування керуючих впливів використовується модель керованого об'єкта, для отримання якої використовуються нейронні мережі. Стверджується, що морські рухомі об'єкти і, зокрема, морські судна належать до класу невизначених об'єктів.

У роботах [6,7] розглянуто проблеми забезпечення навігаційної безпеки судноводіння шляхом підвищення точності контролю та прогнозу місця судна.

У роботі [8] ситуації небезпечного зближення визначають на основі розроблених методів побудови небезпечних зон, потрапляння суден в які може призвести до зіткнення. Для побудови цих зон розглядаються лише навігаційні параметри руху суден.

Ряд особливостей завдання розходження суден в морі висвітлені у роботі [9], в якій наведено метод попередження зіткнення суден шляхом зміщення на паралельну лінію шляху.

У роботі [10] розглянута гібридна модель логічного виведення з об'єднаннями механізму прийняття рішень на основі прецедентів з механізмом, заснованим на правилах або обмеженнях.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Підвищення безпеки руху судна за рахунок удосконалення методів формалізації процесу прийняття рішення щодо запобігання небезпечних ситуацій в єдиній концепції e-navigation..

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Стратегія розходження – це призначений для запобігання ситуації небезпечного зближення (зіткнення) план руху, що містить програмну траєкторію із зазначеною початковою та кінцевою точками та з виділеними на ній ділянками маневрів. Етапи циклу прийняття рішень виконуваного судноводієм завдання попередження зіткнень можна представити так (рис. 1):

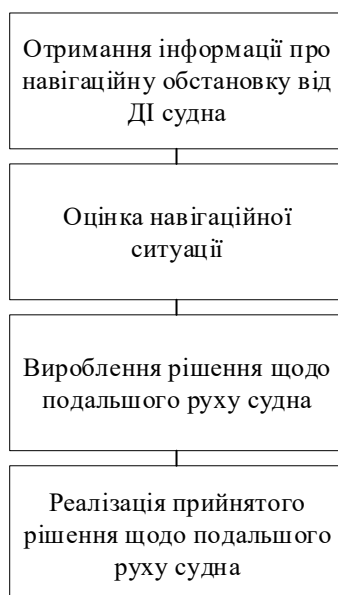


Рис. 1. Етапи циклу прийняття рішень виконуваного судноводієм завдання попередження зіткнень

На етапі вироблення рішення щодо подальшого руху судна виконуються такі операції:

– встановлення меж області, рух судна в якій при маневрі буде безпечним у навігаційному плані;

– виявлення «цілей», які найближчим часом можуть або повинні змінити елементи руху;

– визначення можливих дій для усунення загрози зіткнень;

– прогноз результатів запланованих маневрів з оцінкою їх наслідків;

– вибір допустимих з можливих маневрів.

– визначення найкращого з допустимих маневрів з додатковою перевіркою його відповідності МПЗЗС-72, звичайній морській практиці, обставинам та умовам плавання та знаходження маневру повернення до колишнього курсу/швидкості або до запланованого маршруту.

План руху судна може бути описаний моделями елементарної поведінки [13]. Такий підхід дозволяє спростити планування маневрів під час руху судна та розбити завдання на сукупність взаємопов'язаних дій для реалізації окремих моделей поведінки. Кожна з моделей поведінки складається з елементарних дій, що описується сукупністю нечітких логічних правил виконання певного підзавдання.

Вхідними параметрами для нечітких логічних правил є координати, швидкість та курс судна, характеристики інших суден та навігаційних небезпек. За вхідні дані про характер навігаційної небезпеки та відстань до неї, які можуть бути подані нечіткими множинами з лінгвістичними змінними типу {критично близько, небезпечно близько, близько, далеко} приймаються нечіткі правила. Типовий приклад нечіткого правила:

$$\text{if } FL \text{ is "далеко" and } FR \text{ is "близько" then } h \text{ is "вліво"}, \quad (2)$$

де FL – лінгвістична змінна “попереду ліворуч”;
 FR – лінгвістична змінна “попереду праворуч”;
 h – лінгвістична змінна “курс”.

Структура замкнутої системи, що реалізує поведінковий підхід, наведена на рис. 2.

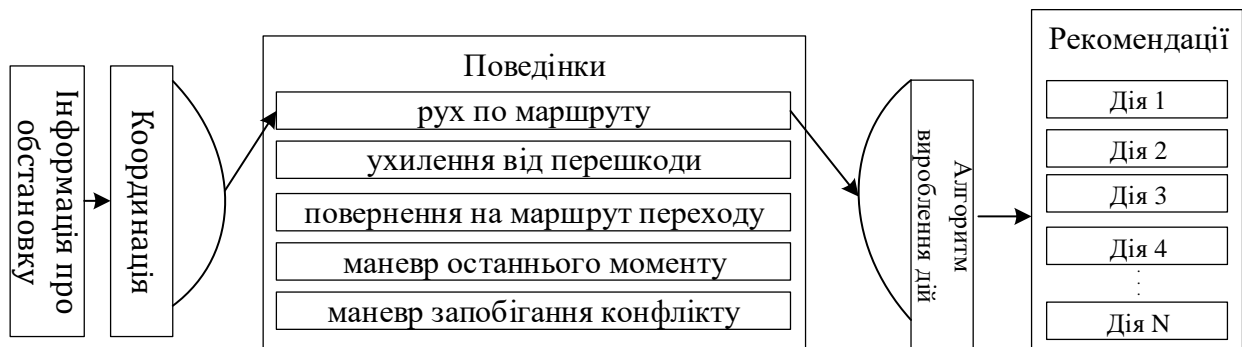


Рис. 2. Структура системи, що реалізує поведінковий підхід прийняття рішень судноводієм

Планування руху судна на основі комбінованого використання моделей елементарної поведінки, а саме: "рух по маршруту", "ухилення від перешкоди", "повернення на маршрут переходу", "маневр останнього моменту", "маневр запобігання конфлікту". Таким чином, на керуючому рівні на основі оцінки обстановки на кожному етапі маршруту розходження приймається рішення, яке активізує певні дії для цього конкретного етапу, замість того, щоб обробити всі стратегії розходження з подальшим їх комбінуванням.

Такий підхід скорочує час і витрати на обчислювальні ресурси. Рішення завдання попередження зіткнень суден із застосуванням координації дій передбачає декомпозицію загальної стратегії розходження на кілька простих окремих дій, кожна з яких подається нечіткими продукційними правилами.

Проте, при прийнятті рішення планування маршруту на основі моделей елементарних поведінок необхідно виконувати їх координацію. За результатами поточного аналізу навігаційної обстановки можуть виникати ситуації, коли одночасно активізуються кілька різних поведінок, при цьому деякі з них можуть конфліктувати між собою. Завдання координації полягає у такому підборі дій з окремих поведінок, щоб отримати набір адекватних параметрів для виконання маневру. Схема методу координації планування траєкторії переміщення судна наведена на рис. 3. На даній схемі використані такі позначення: початкові x_i^{sh}, y_i^{sh} та поточні координати судна $x_{i+1}^{sh}, y_{i+1}^{sh}$; координати навігаційних перешкод у зоні інтересу судноводія x_j^{dn}, y_j^{dn} ; координати суден у зоні інтересу судноводія x_k^{ds}, y_k^{ds} ; масиви навігаційних небезпек ($masDN$) і навігаційних ситуацій ($masDS$); переміщення судна за одну ітерацію $r_{ц}$.

Послідовність етапів методу координації планування траєкторії переміщення судна виконується циклічно до досягнення цільової точки маршруту. На кожному етапі руху судна здійснюється моніторинг попадань навігаційних перешкод та інших суден до зони інтересу судноводія та виявлення потенційної небезпеки від них.

Кожен крок алгоритму можна умовно поділити на два етапи:

1. Аналіз ситуації у кожній точці, де знаходиться судно.
2. Переміщення судна відповідно до вибраної поведінки.

Виконання основних функцій модуля алгоритму здійснюється циклічно до досягнення судном цільової точки (точки у просторі).

На кожній ітерації циклу алгоритму визначається положення судна (координати x_i^{sh}, y_i^{sh}), поточний курс (h), швидкість (V), поведінка учасників конфлікту (або їх навігаційні параметри – beh^Pj) та наявність перешкод в зоні інтересу судноводія (рис. 4). Довжина дистанції маршруту S_i^{route} та час знаходження судна на кожній ітерації задається зоною, на якій судно здатно виконати маневр розвороту на 180° .

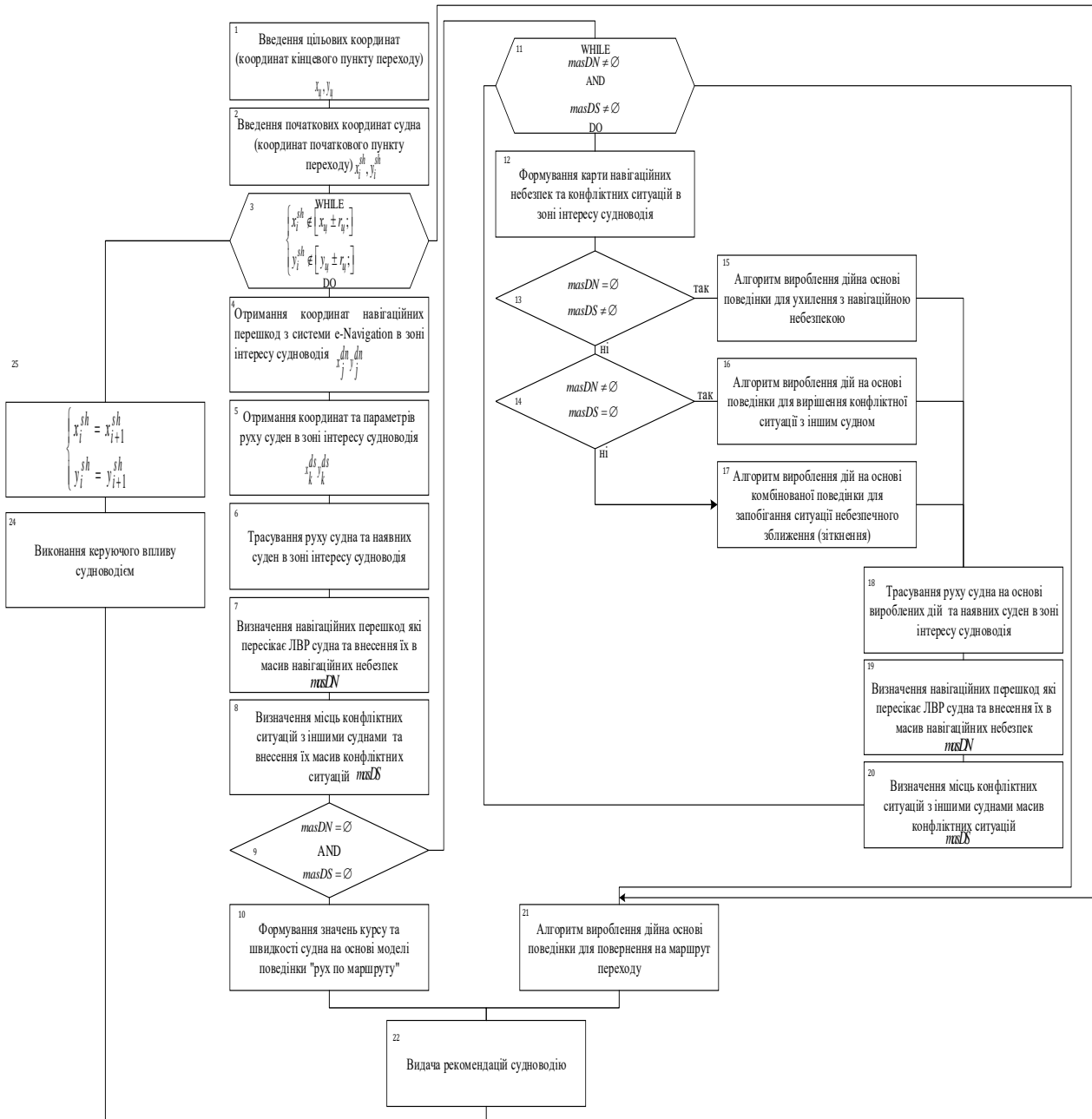


Рис. 3. Схема методу координації планування траєкторії переміщення судна

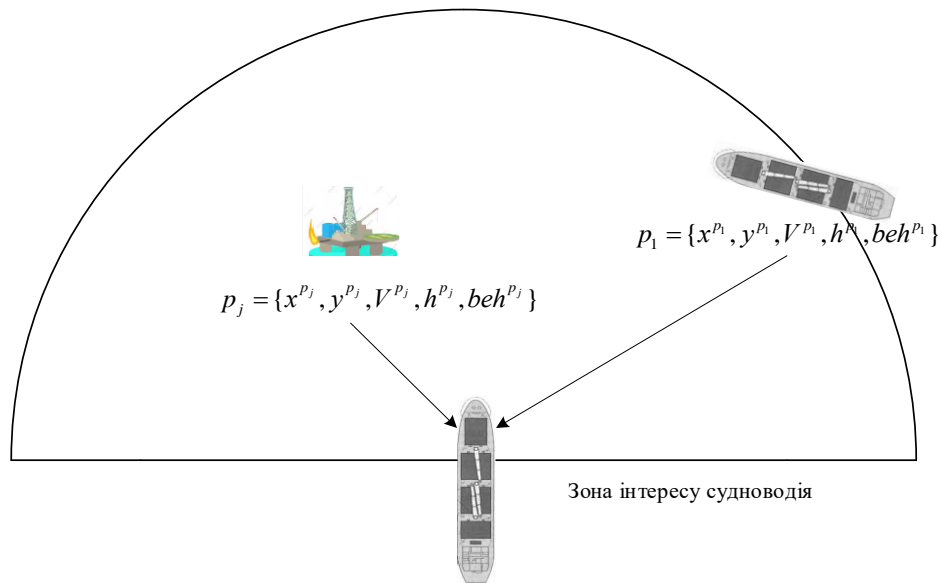


Рис. 4. Виявлення перешкод в зоні інтересу судноводія

Оскільки дії, що складають поведінку судноводія у ситуації надмірного зближення (зіткнення), регламентуються загальноприйнятими рекомендаціями судноводіння МПЗЗС-72, в яких прийняття рішень судноводієм або конфліктуючими сторонами залежить від відстані між ними, то зону інтересу можна формалізувати як показано на рис. 5.

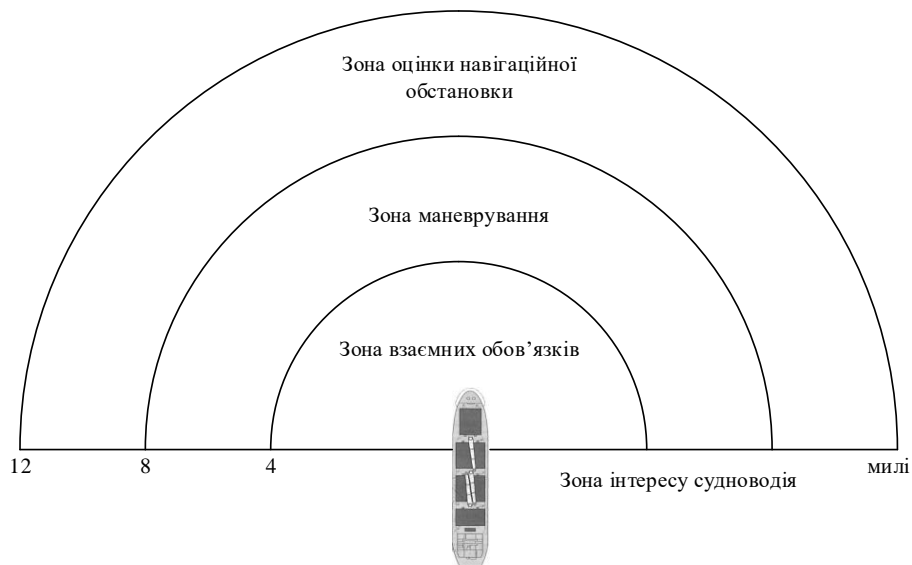


Рис. 5. Розподіл зони інтересу судноводія

Трасування руху власного судна та інших суден та рухомих об'єктів у зоні інтересу судноводія дозволяє прогнозувати місце розташування у подальші моменти часу та виявляти координати місця конфлікту, в яких виникає ситуація надмірного зближення. Більшість суден у відкритому морі переміщуються без зміни напрямку, а в обмежених умовах – за визначеними фарватерами та правилами. Тому трасування перешкод дозволяє спрогнозувати рух суден. При виявленні конфліктної ситуації з іншим судном необхідно враховувати виконання ним правил МПЗЗС-72 і як це позначиться при трасуванні руху конфліктуючого судна на зміні траєкторії його руху. Якщо прогнозована траєкторія руху конфліктуючого судна не збігається з реальною, робиться припущення про неправильне трактування навігаційної обстановки судноводієм та невиконання ним правил. У цьому випадку у точці конфлікту визначаються зона впливу, а саме, визначаються зони можливого маневру, які може виконати судно,

відповідно до своїх технічних характеристик. Метод трасування руху судна та наявних суден у зоні інтересу судноводія наведений на рис. 6.

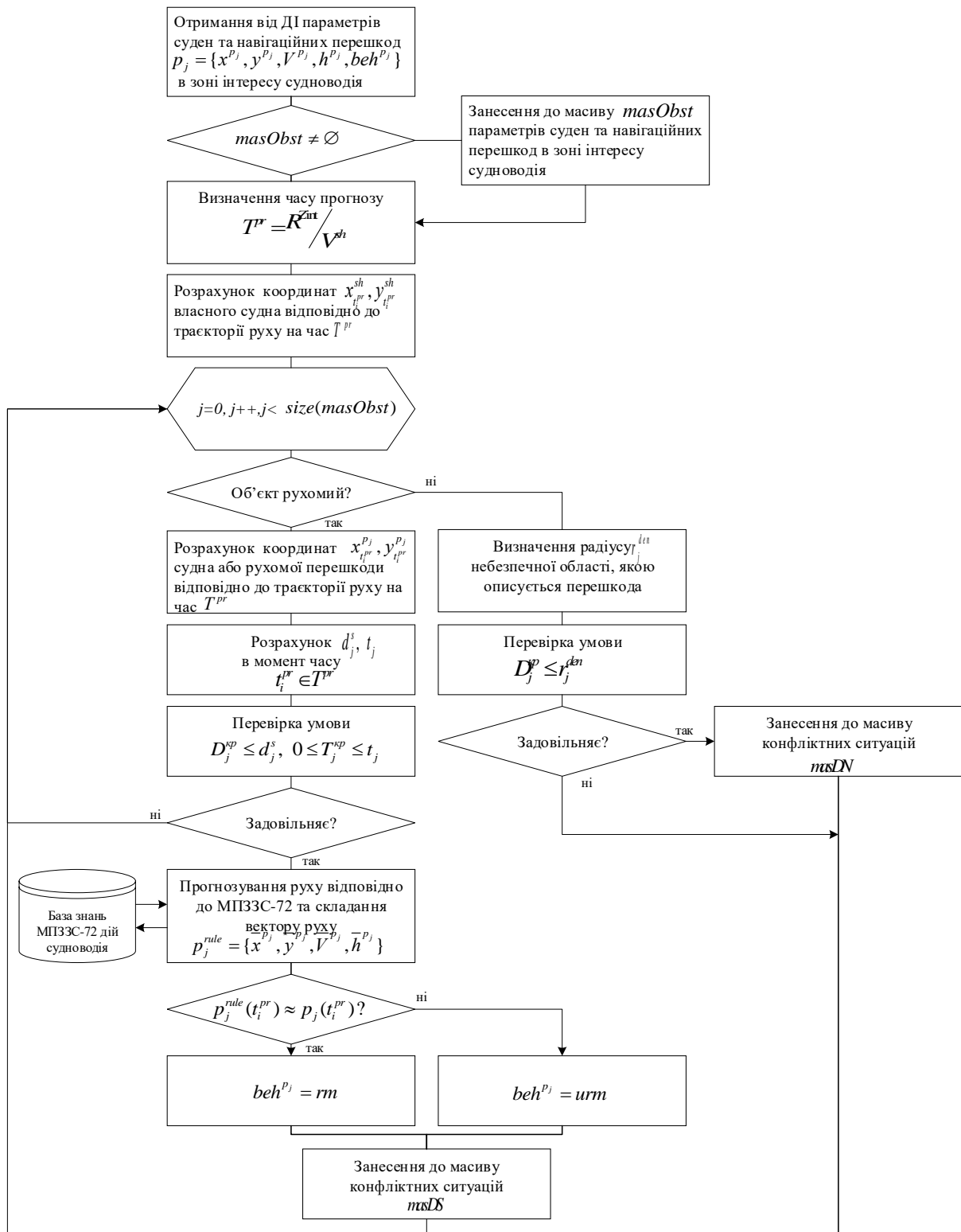


Рис. 6. Метод трасування руху судна та наявних суден у зоні інтересу судноводія

На рис. 6 позначені: $masObst$ – масив об’єктів, що знаходяться у зоні інтересу судноводія; T^{pr} – прогнозний час руху власного судна; R^{Zint} – відстань, яку пройде судно за прогнозний час до небезпеки; $x_{t_i^{pr}}^{sh}, y_{t_i^{pr}}^{sh}$ – координати власного судна відповідно до траєкторії руху на час T^{pr} ; $x_{t_i^{pr}}^{p_j}, y_{t_i^{pr}}^{p_j}$ – координати навігаційної перешкоди відповідно до траєкторії руху на час T^{pr} ;

d_j^s, t_j – відстань та час до навігаційної небезпеки у момент часу j , відповідно; D_j^{kp}, T_j^{kp} – відповідно, відстань та час до навігаційної небезпеки у момент часу j , коли навігаційна ситуація стає критичною; r_j^{den} – радіус небезпечної області, якою описується перешкода; $p_j^{rule}(t_i^{pr})$ – вектор руху судна, який складається з поточних координат, швидкості та курсу судна, розрахований на основі правил МППЗС-72 на час прогнозу t_i^{pr} ; $p_j(t_i^{pr})$ – виконуваний рух судна за вектором, що задає судноводій на час прогнозу t_i^{pr} ; rm, urm – відповідно, збігання або не збігання прогнозованої траєкторії руху конфліктуючого судна з реальною.

Метод формування карти навігаційних небезпек та конфліктних ситуацій в зоні інтересу судноводія (рис. 7) ґрунтуються на модифікованому методі потенційних полів [13]. Даний підхід оснований на фізичній аналогії з рухом заряджених частин в електростатичному полі. Перешкоди генерують відштовхувальні сили, а цільова точка маршруту – силу притягування. Простір пошуку маршруту охарактеризуємо масивом значень потенціальної функції $U(q)$. Розмір $U(q)$ дорівнює кількості елементів простору. Елементом масиву $U(q)$, які не входять до складу наведених вище зон, мають значення, що дорівнює 0. Сила відштовхування від перешкод задається так:

$$U(q) = U_{att}(q) + \sum_{i=1}^n U_{rep}^i(q), \quad (2)$$

де $U_{att}(q)$ – потенційна функція притягання;

$U_{rep}^i(q)$ – потенційна функція відштовхування.

Потенційна функція притягання має вигляд:

$$U_{att}(q) = -\frac{1}{2} k_p (q - q_{it})^2, \quad (3)$$

де k_p – коефіцієнт притягання;

q – дистанція між центром та границею зони впливу об'єкта притягання.

q_{it} – віддаленість елемента простору від центру зони впливу точки притягання.

Потенційна функція відштовхування має вигляд:

$$U_{rep}(q) = \frac{1}{2} k_{app} (q - q_{it})^2, \quad (4)$$

де k_{app} – коефіцієнт відштовхування;

q – дистанція між центром та границею зони впливу об'єкта відштовхування;

q_{it} – віддаленість елемента простору від центру зони впливу об'єкта притягання.

Карті навігаційних небезпек представляється у формі карти-сітки. Розмір квадратів карти вибирається залежно від маневрених характеристик судна. Отримані квадрати поділяємо на такі типи (рис. 7):

- вільні квадрати, через які судно може здійснювати безперешкодний рух (значення потенційної функції в яких дорівнює 0);
- квадрати, рух судна в яких створює ситуацію небезпечного зближення зіткнення (значення потенційної функції в яких менше 0);
- квадрати, рух в яких забезпечує вихід судна до цільової точки (значення потенційної функції в яких більше 0).



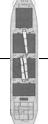
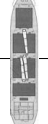
0	0	0	0	$U(q)^+$	0	0	0	0
0	0	0	0	$U(q)^+$	0	$U(q)^-$	$U(q)^-$	$U(q)^-$
0	0	0	0	$U(q)^+$	0	$U(q)^-$		$U(q)^-$
0	0	$U(q)^-$	$U(q)^-$	$U(q)^+$	0	$U(q)^-$	$U(q)^-$	$U(q)^-$
0	0	$U(q)^-$	$U(q)^-$	$U(q)^-$	0	0	0	0
0	0	0	$U(q)^-$	$U(q)^+$	0	0		0
0	0	0	0	$U(q)^+$	0	0	0	0
0	0	0	0		0	0	0	0
0	0	0	0		0	0	0	0

Рис. 7. Карти навігаційних небезпек

Для формального опису простору пропонується використовувати лише поняття потенційної функції для представлення простору у вигляді матриці значень. Застосування методу дозволяє формалізувати всі небезпечні для руху судна зони. Таким чином, карта навігаційних небезпек, в якій рух судна розглядається як послідовне відвідування елементів простору, є багатовимірним масивом, кожному квадрату якого приписується потенційна функція цього елемента простору. Використовуючи різний крок дискретизації, можна розбити простір з необхідною точністю, що дозволить шляхом незначного збільшення вихідного масиву з більшою точністю описувати властивості областей простору і вибирати найбільш раціональні маршрути.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Отже, застосування єдиної концепції e-navigation має на увазі у тому числі прийняття рішення щодо запобігання небезпечних ситуацій у разі надмірного зближення (зіткнення) суден. Але такий підхід потребує розв'язання задачі формалізації таких складних слабо формалізуємих процесів, що й було вирішено у даній статті. Попередні розрахунки показують, що використання у прототипі системи підтримки прийняття рішень загальноприйнятих рекомендацій судноводіння МПЗЗС-72, в яких прийняття рішень судноводієм або конфліктуючими сторонами залежить від відстані між ними, забезпечує підвищення безпеки руху судна за рахунок удосконалення методів формалізації процесів прийняття рішень. Адекватність запропонованого підходу підтверджується тим, що визначення найкращого з допустимих маневрів перевіряється його відповідністю загальноприйнятим рекомендаціям судноводіння МПЗЗС-72, звичайній морській практиці, обставинам та умовам плавання і знаходження маневру повернення до колишнього курсу/швидкості або до запланованого маршруту.

Запропоновано систему, що реалізує поведінковий підхід прийняття рішень судноводієм. Для реалізації координації поведінок розроблено метод координації планування траєкторії переміщення судна. При вирішенні завдань синтезу карти навігаційних небезпек застосовуються елементи методу потенційних полів, що має ряд переваг. Для ефективного застосування необхідна комбінація зі спеціальними процедурами, що вирішують завдання вибору поведінки при плануванні руху судна. Розв'язання задачі підтримки прийняття рішення судноводія на основі комбінації підходів з використанням нечіткої логіки та дозволених

областей дозволяє отримати варіанти дій, які дозволяють забезпечити безпеку руху судна в небезпечній ситуації.

Подальші напрямки роботи спрямовані на розширення бази знань системи підтримки прийняття рішень, моделювання поведінки акторів у ситуаціях небезпечного зближення (зіткнення) з навігаційними небезпеками та отримання такої оцінки ефективності запропонованого підходу, що збігається із рекомендаціями відповідно до МПЗЗС-72, звичайною морською практикою, відповідає конкретним обставинам та умовам плавання і дозволяє знаходити правильні маневри повернення до запланованого маршруту руху.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шумілова К., “Систематизований підхід до класифікації навігаційних ризиків рейсового циклу морського судна,” *Scientific Collection «InterConf+»*, vol. 24(121), doi: <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.08.2022.032>, pp. 337–358, 2022.
2. Вагущенко Л.Л., *Современные информационные технологии в судовождении. [Электронное учебное пособие]*. Одесса: ОНМА, 2013.
3. Вагущенко Л.Л., Вагущенко А. Л., *Поддержка решений по расхождению с судами*. Одесса: Феникс, 2010.
4. Цымбал Н.Н., Булгаков М.А., Байрак В.В. “Определение группы взаимодействующих судов в ситуации опасного сближения” *Судовождение*, No 16, с. 193-197, 2009.
5. Волков Є.Л., “Вдосконалення методу локально-незалежного управління процесом розходження суден використанням областей неприпустимих значень параметрів,” Дис. канд. техн. наук: 05.22.13. Одеса, 2018.
6. Paulauskas V., Paulauskas D., Steenberg C. M., “External forces influence on ships steering in extreme conditions,” *Transport Means 2006: Proceedings of the 10 International Conference*, Kaunas, Oct. 19-20, 2006. Kaunas: Technologija. 2006, pp. 158-160.
7. Дакі О.А., Дорошева А.О., Іваненко В.М., Чебан В.І., “Агентоорієнтована модель реалізації системи підтримки прийняття рішення безпеки судноводіння,” *Системи озброєння і військова техніка*, No 3(63), doi: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.18>, с. 122-129, 2020.
8. Сікірін В.Є., “Оптимізація управління рухом судна за мінімумом траєкторної похибки,” Дис. канд. техн. наук: 05.22.13. Одеса, 2018.
9. Fusheng Zha, Yizhou Liu, Xin Wang, Fei Chen, Jingxuan Li, Wei Guo, “Robot motion planning method based on incremental high-dimensional mixture probabilistic model,” *Control Design for Systems Operating in Complex Environments*, № 5, doi: <https://doi.org/10.1155/2018/4358747>, pp. 3-14, 2018.
10. Мельник О.М., “Експлуатація неспеціалізованих суден при транспортуванні негабаритних і великовагових вантажів,” Дис. канд. техн. наук: 05.22.20. Одеса, 2021.
11. Бурмака І.А., Пятаков Э.Н., Булгаков А.Ю., *Управление судами в ситуации опасного сближения*. Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016.
12. Зазірний А.А., “Метод формування динамічного простору рівнів небезпеки зон в районі плавання при вирішенні задачі розходження судна з навігаційними небезпеками,” *Кібернетика та системний аналіз*, № 1(67), doi: [10.30748/zhups.2021.67.15](https://doi.org/10.30748/zhups.2021.67.15), с. 110-118, 2021.
13. Yang C., Peng G., Li Y., Cui R., Cheng L., and Li Z., “Neural networks enhanced adaptive admittance control of optimized robot-environment interaction,” in *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 49, no. 7, doi: [10.1109/TCYB.2018.2828654](https://doi.org/10.1109/TCYB.2018.2828654), pp. 2568-2579, 2019.

REFERENCES

1. Shumilova K., “A systematized approach to the classification of navigational risks of the voyage cycle of a sea vessel,” *Scientific Collection «InterConf+»*, vol. 24(121), <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.08.2022.032>, pp. 337–358, 2022. [in Ukrainian].
2. Vagushchenko L.L., *Modern information technologies in navigation [Electronic textbook]*. Odessa: ONMA, 2013. [in Russian].
3. Vagushchenko L.L., Vagushchenko A. L., Support for decisions on disagreement with the courts. Odessa: Fenyks, 2010. [in Russian].
4. Tsymbal N.N., Bulhakov M.A., Bairak V.V. “Determination of a group of interacting ships in a dangerous approach situation,” *Sudovozhdenie*, № 16, pp. 193-197, 2009. [in Russian].
5. Volkov Ye.L., “Improvement of the method of locally independent management of the process of separation of ships using areas of unacceptable parameter values,” dis. cand. tech. Sciences: 05.22.13. Odesa, 2018. [in Ukrainian].
6. Paulauskas V., Paulauskas D., Steenberg C. M., “External forces influence on ships steering in extreme conditions,” *Transport Means 2006: Proceedings of the 10 International Conference*, Kaunas, Oct. 19-20, 2006. Kaunas: Technologija. 2006, pp. 158-160.
7. Daki O.A., Dorosheva A.O., Ivanenko V.M., Cheban V.I., “Agent-oriented model of implementation of the decision support system for the safety of navigation,” *Weapon systems and military equipment*, № 3(63), doi: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.18>, pp. 122-129, 2020.
8. Sikirin V.Ye., “Optimization of ship movement control by minimum trajectory error,” dissertation. ... candidate technical of science: 05.22.13. Odesa, 2018. [in Ukrainian].
9. Fusheng Zha, Yizhou Liu, Xin Wang, Fei Chen, Jingxuan Li, Wei Guo, “Robot motion planning method based on incremental high-dimensional mixture probabilistic model,” *Control Design for Systems Operating in Complex Environments*, № 5, doi: <https://doi.org/10.1155/2018/4358747>, pp. 3-14, 2018.
10. Melnyk O.M., “Operation of non-specialized vessels in the transportation of oversized and heavy cargo: dissertation,” Dis. candidate technical of science: 05.22.20. Odesa, 2021. [in Ukrainian].
11. Burmaka I.A., Piatakov Ye.N., Bulhakov A.Yu., *Ship control in dangerous proximity situations*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. [in Russian].
12. Zazirnyi A., “Method for forming dynamic space hazard levels in zones in the navigation area when solving the problem of discovering a vessel with navigation hazard,” *Cybernetics And Systems Analysis*, № 1(67), doi: [10.30748/zhups.2021.67.15](https://doi.org/10.30748/zhups.2021.67.15), pp. 110-118, 2021.
13. Yang C., Peng G., Li Y., Cui R., Cheng L., and Li Z., “Neural networks enhanced adaptive admittance control of optimized robot-environment interaction,” in *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 49, no. 7, doi: [10.1109/TCYB.2018.2828654](https://doi.org/10.1109/TCYB.2018.2828654), pp. 2568-2579, 2019.