

УДК 656.61.052.484

DOI: 10.31653/2306-5761.37.2025.78-91

COMPREHENSIVE CONSIDERATION OF HAZARD FACTORS TO ENSURE SAFE NAVIGATION IN PRESSURE WATERS

КОМПЛЕКСНЕ ВРАХУВАННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ЧИННИКІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗАВАРІЙНОГО СУДНОВОДІННЯ В СТИСЛИХ ВОДАХ

D.S. Zhukov, senior lecturer

Д.С. Жуков, ст. викладач

National University "Odessa maritime academy", Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

The paper discusses the challenges of navigating vessels in narrow waters, where the presence of shoals, shallow areas, and intensive traffic significantly increases the risk of navigational hazards. Errors in navigation measurements and maneuvering further contribute to collision and grounding risks. In such conditions, the navigator forms a mental model that integrates information about the vessel's position, planned route, surrounding hazards, moving objects, and navigational aids. This complex and often overwhelming flow of information may exceed the navigator's cognitive capacity, leading to decision-making errors and accidents. To prevent this, it is essential to develop methods for synthesizing navigational risk factors and presenting them in a way that is easily interpreted and supports safe decision-making. A key requirement is the visual representation of navigation accuracy within the vessel's area of movement. This allows for timely adjustments to the vessel's course and helps minimize positional errors. For each local area comparable in size to the vessel, vector error accuracy should be calculated relative to the area's center, using various combinations of landmarks to determine the most precise coordinate estimates. The study also notes that maneuvering in coastal waters using standard gyrocompasses introduces inertial errors, causing lateral deviations from the planned path. These displacements must be accounted for in navigational information systems. Finally, the paper presents analytical expressions that describe the main factors contributing to navigational risks.

Keywords: navigational safety, navigational accident factors, accuracy field, navigational situation.

АНОТАЦІЯ

У статті розглядаються виклики, пов'язані з навігацією суден у звужених водах, де наявність мілин, мілководдя та інтенсивний рух значно підвищують ризик навігаційних небезпек. Помилки у вимірюваннях та маневруванні додатково створюють загрозу зіткнень і посадки на міліну. У таких умовах навігатор формує ментальну модель, що поєднує інформацію про положення судна, запланований маршрут, небезпеки, рухомі об'єкти та навігаційні засоби. Цей обсяг даних часто перевищує когнітивні можливості людини, що може призводити до помилок у прийнятті рішень і, як наслідок, до аварій. Щоб запобігти цьому, необхідно розробити методи комплексного врахування навігаційних ризиків і представлення їх у зручному для сприйняття вигляді, який сприятиме безпечному прийняттю рішень. Однією з основних вимог є візуальне відображення точності навігації в межах зони руху судна. Це дозволяє вчасно коригувати маршрут і зменшити похибки у визначенні положення судна. Для кожної ділянки, розмір якої співмірний із розмірами судна, потрібно розраховувати векторну похибку відносно її центру,

використовуючи різні поєднання навігаційних орієнтирів і обираючи найбільш точну оцінку координат. Також зазначено, що використання стандартних гірокомпасів під час маневрування у прибережних водах призводить до інерційних похибок і бічного відхилення судна від заданого маршруту, що потребує врахування в інформаційній системі. У роботі наведено аналітичні вирази, які описують основні чинники виникнення навігаційних ризиків.

Ключові слова: навігаційна безпека, фактори навігаційних аварій, поле точності, навігаційна ситуація.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями

Плавання суден в стислих водах характеризується підвищеним рівнем навігаційної аварійності, що обумовлено наявністю навігаційних перешкод у вигляді мілин та мілководних районів. Похибки навігаційних вимірювань та маневрування судна породжують ризики навігаційної аварійності. Стислим водам також притаманне інтенсивне судноплавство, що веде до появи ситуацій небезпечного зближення і ризиків зіткнення.

Відображення ризиків навігаційної ситуації у цілісний об'єкт, що комплексно характеризує положення судна щодо програмної траєкторії руху, навігаційних небезпек, рухомих цілей, засобів навігаційного обладнання тощо, проводиться у свідомості судноводія і на його підставі проводиться вибір прийнятого рішення. Це великий об'єм поточної інформації, яка іноді перевищує пропускну спроможність судноводія, що може привести до можливої аварії. Тому необхідна розробка способів комплексного врахування чинників навігаційної аварійності і представлення їх у вигляді належного сприйняття судноводієм для прийняття рішень, які забезпечують безаварійну навігацію.

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

Проблемі забезпечення безаварійності судноводіння присвячена значна кількість робіт по тематиці безпеки мореплавання. Причому проблема має ряд складових, кожна з яких направлена на зниження впливу суттєвого чинника аварійності.

Одним із найбільш важливих чинників аварійності являється зіткнення суден, для попередження яких розроблено різні системи прийняття рішень, чому присвячено значне число робіт.

В роботі [1] проведено аналіз основних методів урахування вимог COLREGs в ситуаціях небезпечного зближення суден, що рекомендуються для систем розходження, який показав, що застосування COLREGs пов'язано з труднощами нечіткого визначення ряду термінів і понять. Значна кількість спеціалістів вважає, що вибір значень параметрів розходження для ситуації небезпечного зближення має виконувати сама система. Монографія [2] присвячена особливостям розходження суден шляхом зміщенням на лінію паралельну шляху.

Систему вибору маневру розходження, що відповідає вимогам COLREGs запропоновано в роботі [3]. Її буде реалізовано та виконано тестування на автономному безпілотному надводному судні, а також на тренажерах. В роботі відмічено важливість програмного забезпечення для запобігання зіткнень суден.

Як показано в роботах [4,5], задача вибору оптимального маневру розходження суден в ситуації небезпечного зближення характеризується високою складністю і процес управління рухом судна є багатовимірним та нестационарним, причому задача розходження суден носить ігровий характер.

У роботі [6] запропоновано гібридну тришарову систему розходження для автономних апаратів, яка враховує Правила 8 і 13-17 COLREGs. Система містить плануючий модуль для розрахунку маневру розходження з урахуванням COLREGs. Методи диференціальної різницевої гри для опису процесу розходження суден запропоновано у роботі [7].

Метод максимальної зміни курсу і мінімальної зміни швидкості в ситуації розходження з декількома небезпечними суднами запропоновано у статті [8], в якій підкреслюються його ефективність для розходження кількох суден.

Теоретичне обґрунтування системи ухилення від зіткнення для автономних суден викладено у роботі [9], в якій представлено алгоритм вибору маневру розходження. Приведено вимоги до автономного судноводіння, які ураховують фактори, впливаючі на процес розходження. Відмічається, що вирішення задач автоматизації управління судном проводяться у класичному чи комп'ютерному варіанті. Класичний варіант використовує математичні моделі, а при комп'ютерному варіанті задіяні методи штучного інтелекту.

Основним методам автоматичного визначення маневру розходження суден присвячені статті [10,11], в яких також приведено результати проведеного аналізу.

У роботі [12] було запропоновано графічні інструменти для полегшення вибору, оцінки та коригування дій попередження зіткнення в ситуаціях з рухомими та нерухомими перешкодами, припускаючи, що такі ситуації не є екстремальними або звичайними для вітрильних суден і що цільові параметри руху є постійними або їх майбутня зміна відома. Розглядався вибір комбінованого Z-маневру ухилення (зміна курсу і швидкості в одній точці та повернення до вихідних значень цих параметрів в іншій точці) і однієї комбінованої дії (зміна курсу і швидкості у вибраній точці). Розроблені графічні засоби містять діаграми, що відображають вісім зон дій, і спеціальні позначки цілей у момент їх максимального наближення до власного судна. З огляду на COLREG і хорошу морську практику, ці зони були розташовані в порядку пріоритету застосування. Для побудови діаграм використано результати перерахування репрезентативної дискретної множини можливих варіантів маневру.

Посадка на міліну та зіткнення все ще становлять найвищий відсоток морських аварій, незважаючи на поточну увагу до морської освіти та навчання та покращення можливостей датчиків зазначається в статті [13]. Зіткнення відбувається через людську помилку з наслідками від помірних до серйозних, із значним впливом як на навколишнє середовище, так і на життя на морі. У цьому документі короткі статистичні дані щодо людського фактора як першопричини морських інцидентів разом із неправильним розумінням правил зіткнень представлені як базовий розділ. Крім того, у цій роботі обговорюється архітектура системи підтримки прийняття рішень, щоб запропонувати відповідні дії, коли виявлено ризик потенційного зіткнення. Запропонована система архітектури базується на різних модулях, інтегрованих із відповідними вхідними даними датчиків щодо навколишньої зони навігації. Як наслідок, інструмент може підтримувати вахтових офіцерів у процесі прийняття рішень, надаючи завчасні пропозиції відповідно до положень про зіткнення. Запропонована система призначена для використання на борту незалежно від ступеня автоматизації судна, і вона базується на AIS, яка є обов'язковою, що робить її широко застосовною. Правильне використання системи може значно зменшити кількість зіткнень, як продемонстрували отримані результати.

В роботі [14] представлено спосіб послідовного розходження судна з двома небезпечними цілями з графічним відображенням вибраного маневру розходження, а в роботі [15] запропоновано розробку суднової інформаційної системи попередження зіткнень з урахуванням навігаційних перешкод, для чого використовуються електронні карти.

Розробка і використання інформаційних систем імітаційного моделювання руху суден зі складними динамічними моделями, в залежності від кута кладки руля і обертів двигуна відображені в роботах [16-22].

В роботі [16] відзначається, що зростання вантажопідйомності сучасних суден викликає необхідність удосконалених комп'ютерних систем для їх безпечного плавання. У таких системах використовуються прогнозні інструменти руху суден, які успішно застосовуються протягом тривалого часу. Однак спрощення існуючих прогнозів обмежує їх використання в частині негайного відображення руху судна при зміні положення руля та обертів двигуна. Необхідна точність реалізації криволінійної траєкторії руху судна може бути забезпечена більш удосконаленими прогнозованими моделями руху судна.

В даний час, як показано в роботі [17], проводиться розробка інформаційної системи імітаційного моделювання руху суден зі складними динамічними моделями, в залежності від кута кладки руля і обертів двигуна. Дана система дозволить забезпечити новий тип планування маневру судна і контроль реалізації заданого маневру. Попередньо в процесі маневрування відображати задані маневри одночасно з фактичним рухом судна та з індикацією прогнозованої траєкторії, яка визначає реальні вхідні дані від датчиків судна. Далі відзначимо, що така система вирішує пряме завдання відображення прогнозованої траєкторії за заданими параметрами маневру, хоча актуальною є зворотна задача визначення попереднього маневру за параметрами програмної траєкторії руху. Іншими словами, слід розрахувати момент часу початку повороту і його тривалість для заданого кута кладки пера руля, що забезпечує вихід судна в задану точку.

Робота [18] присвячена питанням ідентифікації судових моделей маневрування, які є ключем до дослідження маневреності судна, проектування системи управління рухом суден і розвитку системи управління судовими тренажерами. У цій роботі на основі аналізу гідродинаміки судна створена нелінійна модель маневрування судна. Теорія ідентифікації системи використовується для оцінки параметрів моделі, для розрахунку яких пропонується алгоритм, заснований на розширеній теорії фільтра Калмана. Для отримання вхідних і вихідних даних системи параметрів, необхідних для ідентифікації експерименту, використовувалися циркуляція і зигзагоподібний маневр, які виконуються на імітаторі управління судном. З допомогою цього алгоритму усуваються похибки, внесені під час процесу вимірювання.

В роботі [19] автор розглядає інтелектуальну систему прогнозування руху судна, яка імітує процес навчання автономного блоку управління, створеного за допомогою штучної нейронної мережі. Блок управління надає вхідні сигнали і вираховує значення необхідних маневрових параметрів судна в стислих водах. Основною задачею є система постійного контролю навігаційних суден і прогноз їх значень після заданого параметрами інтервалу часу. Результати прогнозування містяться в тому вигляді, як попередження судноводія про виниклу загрозу.

Математичні моделі зміни курсу судна при повороті без урахування часу перекладання пера керма, наведеного в роботі [20]. Всього представлено три моделі різного ступеня адекватності реального процесу повороту і виявлено відповідність математичних моделей експериментальним натурним спостереженням конкретних суден. Отримано аналітичні вирази для розрахунку тривалості обох фаз повороту способом простих ітерацій. Повідомляється про розробку навігаційної інформаційної системи забезпечення маневрування суден, яка містить модель розрахунку параметрів повороту судна. За завданням відрізків програмної траєкторії та величини зміни курсу між ними система розраховує момент початку повороту судна і його траєкторію з урахуванням кута перекладки стерна та динамічних характеристик судна.

В роботах [21,22] розглянуто питання врахування характеристик поворотності судна при розрахунку параметрів його повороту та забезпечення необхідної точності повороту судна способом переміщення його криволінійної траєкторії, які використовуються в запропонованій інформаційній системі управління судном.

Метод оцінки навігаційної безпеки при проходці судна стислим маршрутом запропоновано в роботах [23,24], який дає можливість заздалегідь визначити вірогідність безаварійної проводки вибраним маршрутом, межі якого формалізуються за допомогою електронної карти. При цьому, як показано в роботі [25], враховується закон розподілу похибки бокового відхилення від програмної траєкторії руху.

Для оцінки точності визначення місця судна по завданням орієнтирам в роботі [26] замість маршрутних графіків точності [27] пропонується на електронній карті формувати поле точностей, що забезпечить вибір найбільш безпечної траєкторії плавання.

Як показує проведений аналіз, відсутні роботи по урахуванні одночасного впливу різних факторів навігаційної небезпеки і комплексного представлення інформації судноводію для прийняття коректних рішень, які забезпечують безаварійність плавання.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Ціллю роботи являється розгляд питання комплексного врахування небезпечних чинників для забезпечення безаварійного судноводіння в стислих водах шляхом розробки бортової комп'ютерної інформаційної системи синтезу навігаційної ситуації.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Дамо визначення термінам навігаційної обстановки та навігаційної ситуації. Під навігаційною обстановкою будемо розуміти сукупність параметрів, що характеризують процес судноводіння, які можуть бути безпосередньо виміряні. До них відносяться пеленги та дистанції до навколишніх цілей, їх курси та швидкості, наявність та межі навігаційних небезпек, що залежать від глибин та осідання судна, позиції навігаційного огороження, характеристики гідрометеорологічних умов.

Під навігаційною ситуацією розумітимемо таке комплексне уявлення та відображення параметрів навігаційної обстановки, що містить інформацію про її рівень безпеки, тобто про ризик виникнення навігаційної аварії. Традиційно формування навігаційної ситуації технічними засобами проводилося фрагментарно і незв'язано: за допомогою РЛС або САРП відображалася ситуація в частині поведінки рухомих об'єктів, обсервоване місце судна на карті характеризувало його положення щодо навігаційних небезпек та програмної траєкторії руху, частина інформації надходить безпосередньо від візуального спостереження. Синтез навігаційної ситуації з розрізнених фрагментів у цілісний об'єкт, що комплексно характеризує положення судна щодо програмної траєкторії руху, навігаційних небезпек, рухомих цілей, засобів навігаційного обладнання тощо, проводиться у свідомості судноводія і на його підставі проводиться вибір прийнятого рішення.

З розвитком інформаційних комп'ютерних технологій синтез навігаційної ситуації дедалі більше покладался на технічні засоби. З появою електронних карт, ЕКДІС, супутникової навігації, АІС при використанні САРП синтез та відображення навігаційної ситуації виробляються комплексно, причому базовим елементом є електронна карта, на яку наноситься поточна позиція судна, позиції та параметри руху навколишніх цілей як від САРП, так і від АІС. Іноді є можливість виведення інформації про гідрометеорологічні параметри. Такий

спосіб подання навігаційної ситуації значно полегшує судноводію прийняття ефективних рішень щодо забезпечення безпечного судноводіння.

Однак описане уявлення навігаційної ситуації є неповним. Дуже суттєвими аспектами, що впливають на безпеку судноводіння, особливо в районах з ненадійним прийомом сигналу супутникових навігаційних систем, є точнісні характеристики місця судна, урахування та індикація інерційних характеристик суден за допомогою суднових безпечних зон, загальна оцінка показника безпеки поточної навігаційної ситуації, вплив зовнішніх чинників.

Тому сучасну модель відображення навігаційної ситуації необхідно доповнити, насамперед, візуальним відображенням точності в районі плавання судна, з тим, щоб можна було оперативно провести коректуру програмної траєкторії для підвищення точності контролю місця судна та вибору найбільш сприятливих умов, що мінімізують позиційні похибки обсервацій судна. Слід зазначити, що для кожної елементарної площини, порівнянної з габаритами судна, в районі його плавання необхідно розрахувати точності характеристики векторної похибки щодо центру елементарної площини, вибираючи різні поєднання орієнтирів і проводячи індикацію найбільш точної оцінки координат і групу орієнтирів, при якій вона досягається.

Візуалізація такого поля точностей у районі руху судна можлива шляхом використання колірного представлення значень критерію точності та накладання такого поля у прозорому режимі на електронну картку. У такому випадку до вихідної моделі навігаційної ситуації додається наочна інформація про точність контролю місця судна, а навколо обсервованої точки можна побудувати допустиму точнісну область, яка характеризує ймовірність того, що вона накриває справжнє місце судна. Наприклад, для нормального розподілу векторної позиційної похибки формою такої допустимої точності є еліпс.

Поряд із позиційними векторіальними похибками необхідно враховувати, що після маневрів судна, особливо у високих широтах і на значних швидкостях, виникають інерційні похибки гірокомпасу, що викликають бічне усунення судна щодо програмної траєкторії його руху. Оцінка можливої ширини смуги бічного усунення після маневру судна, показана на електронній карті, дає судноводію інформацію про додатковий ризик посадки судна на міліну і дозволяє уникнути цього.

У ситуаціях, коли на судно впливає постійний зовнішній момент, виникають несиметричні ризикання судна, в результаті яких з'являється відхід судна з програмної траєкторії руху. На точність утримання судна на програмної траєкторії, як у деяких літературних джерелах, також впливає ширина суднового ходу, тобто. ширина смуги, що виникає при ризиканні судна на постійному курсі. Оцінка та відображення зазначених факторів у вигляді графічної інформації, нанесеної на електронну карту, дозволить враховувати її у процесі прийняття рішень щодо вибору ефективного управління судна.

Розглянемо коротко вплив основних із згаданих факторів на точність проведення судна, та оцінити доцільність їхнього обліку. При керуванні судном виникає його ризикання щодо заданої траєкторії руху і, отже, бічна складова усунення судна. Для оцінки доцільності урахування згаданої бічної складової як одного з параметрів поточної навігаційної обстановки знайдемо її можливу максимальну величину. Припустимо, що судно, що рухається, здійснює ризикання щодо програмної траєкторії і виникають його бічні зміщення. Оцінимо максимальні значення величини бічного усунення, припускаючи, що ризикання судна носять гармонійний характер, тобто:

$$\alpha = \alpha_0 \sin \omega_0 t, \quad (1)$$

де α_0 і ω_0 - відповідно амплітуда та частота ризикання судна.

Бічний зсув судна d визначається складовою швидкості судна, яка перпендикулярна програмної траєкторії його руху. Величина поточного значення бічного усунення d визначається виразом:

$$d = \int_0^t V_c \sin \alpha d\tau = V_c \int_0^t \sin(\alpha_0 \sin \omega_0 \tau) d\tau, \quad (2)$$

Так як амплітудні значення кутів рискання суден у реальних умовах плавання не перевищують $5-7^\circ$, то можна замінити самим кутом у радіанній мірі. Отже:

$$d = V\alpha_0 \int_0^t \sin \omega_0 \tau d\tau = -\frac{V\alpha_0}{\omega_0} \cos \omega_0 \tau \Big|_0^t = \frac{V\alpha_0}{\omega_0} (1 - \cos \omega_0 t), \quad (3)$$

або $d = \frac{V\alpha_0}{\omega_0} (1 - \cos \omega_0 t)$. Аналіз отриманого виразу показує, що максимальне значення бічного зміщення досягається, коли $\cos \omega_0 t = -1$, тобто при $\omega_0 t = \pi$. Тому:

$$d_{\max} = 2 \frac{V\alpha_0}{\omega_0}, \quad (4)$$

Для оцінки величини максимального значення бічного зміщення в метрах отриману формулу необхідно записати у вигляді:

$$d_{\max} = 1,28 \frac{VT\alpha_0}{360}, \quad (5)$$

де швидкість судна V вводиться у вузлах, період рискання судна T – у секундах, а α_0 – у градусах. За цією формулою за допомогою комп'ютеру проводилася оцінка значення максимального бічного зміщення для $\alpha_0 = 3^\circ$, якщо період рискання судна T не перевищує 150 с, а швидкість судна V не більше 30 вузлів. Найбільше значення $d_{\max}$ для даних параметрів становить 48 м, що можна порівняти з шириною судна. Тому проводити урахування максимального значення бічного усунення $d_{\max}$ недоцільно.

Інформаційна система для вибору поточного безпечного маршруту руху повинна базуватися на електронній карті району плавання, яка містить обсервоване місце судна і на яку нанесено сумарне поле точностей, що залежить від основних факторів. До таких факторів відносяться позиційні похибки, що відповідають обраним орієнтирам для обсервації місця судна, лінійні зміщення, що виникають від сумарної інерційної похибки та можливе знесення судна від несиметричних рискань під впливом постійно діючого моменту. Докладний опис способу для вибору безпечного маршруту руху з урахуванням наявного сумарного поля точностей розглянуто нижче.

Допустимо, отримано сумарне поле точностей, яке представлено на рис.1 ділянками різної інтенсивності кольору – чим менше похибка контролю місця судна, тим світліша ділянка карти. У наведеному прикладі поле точностей формується за допомогою двох орієнтирів, показаних колами в нижній лівій частині рисунка, по чотирьох лініях положення (два пеленги і дві дистанції). Розрахунок показника точності D_{md} для кожної ділянки електронної картки виконувався за таким виразом:

$$D_{md} = \frac{\left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2} + \frac{1}{\sigma_{D2}^2} + \frac{1}{\sigma_{P2}^2}\right)}{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2 \sigma_{D2}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2 \sigma_{P2}^2}\right) \sin^2 \beta + \left(\frac{1}{\sigma_{D1}^2 \sigma_{P2}^2} + \frac{1}{\sigma_{P1}^2 \sigma_{D2}^2}\right) \cos^2 \beta \right]}, \quad (6)$$

де σ_{Di}^2 - дисперсія лінії положення по дистанції;

σ_{Pi}^2 - дисперсія лінії положення по пеленгу;

β - горизонтальний кут у місці судна між орієнтирам.

На рис. 1 обсервоване місце судна показано у верхній частині зображення. Для вибору безпечного курсу судна за допомогою допоміжних засобів наносяться спочатку обмежувальні дуги навколо небезпечних орієнтирів, які в нашому прикладі є одночасно і орієнтирами для визначення положення судна. Потім з обсервованого місця судна до обмежувальних дуг проводять дотичні, показані на рис. 1 пунктирними лініями, які утворюють сектор безпечних курсів. Максимально безпечний маршрут вибирається напрямком руху, який перетинає найсвітліші райони карти та показано чорною лінією. Урахування інерційності судна провадиться за допомогою судової безпечної зони, яка може виводитися на екран як додаткова інформація.

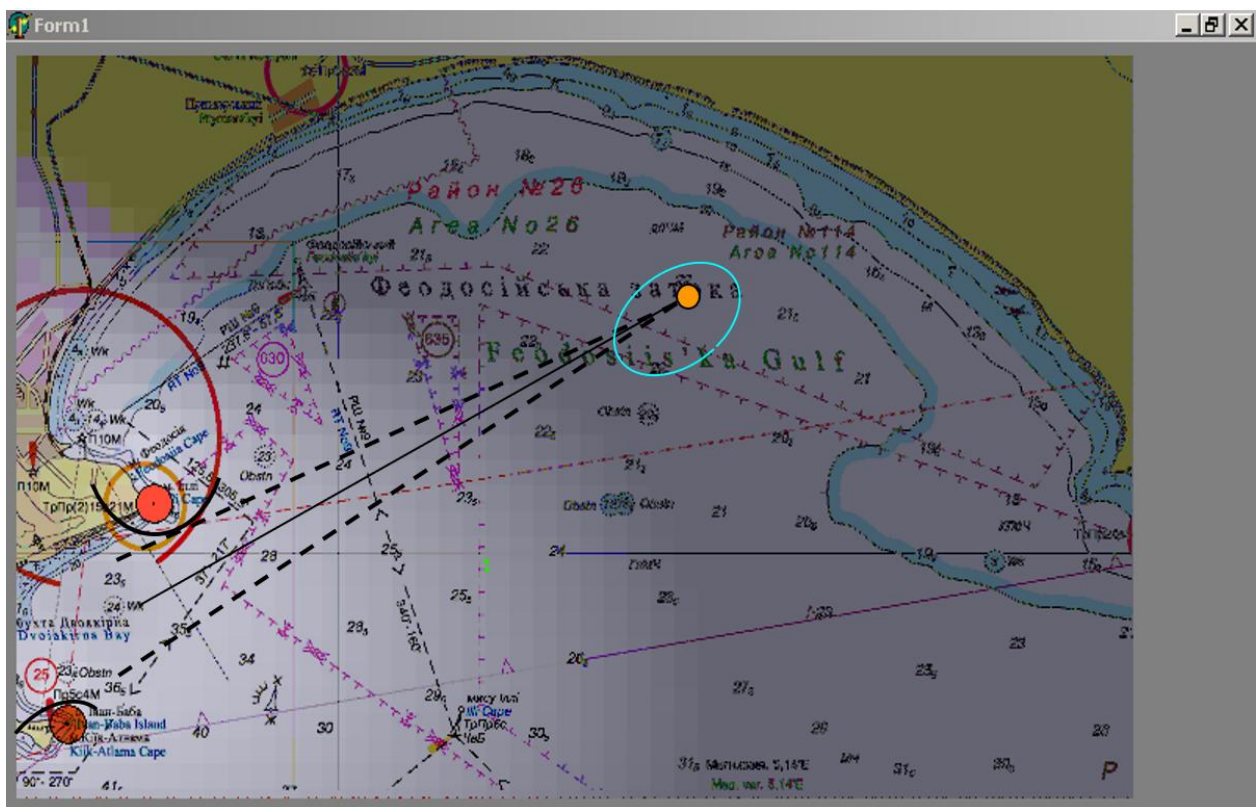


Рис. 1. Відображення поля точностей з двох орієнтирів

У даному прикладі судова безпечна зона має форму еліпса зі зміщеним центром, яка будується навколо обсервованого місця. На рис. 1 вона показана у напрямку обраного безпечного маршруту руху. У пропонованій навігаційній інформаційній системі для отримання поля точностей необхідно відзначити два або три орієнтири, вказати наявність або відсутність маневру.

За наявності маневру слід зазначити його характер та інтервал часу після виконання. І тут враховується величина можливого максимального зміщення як смуги руху судна. Спільне урахування даних факторів здійснюється одним із модулів програми, який автоматично розраховує поле точностей та забарвлює відповідно йому необхідний район електронної карти. Оператором задається допустима дистанція до навігаційних перешкод, а потім відзначаються найбільш небезпечна з правого та лівого боку. Щодо них автоматично наносяться обмежувальні дуги. Використовуючи допоміжну функцію, оператор наносить межі сектора безпечних курсів, а потім, аналізуючи сумарне поле точності, вибирає найбезпечніший маршрут руху.

Маневрування судна у прибережних водах у стандартних типах гірокомпасу викликає сумарну інерційну похибку, що позначена δ_j^Σ . Математичний опис сумарної інерційної похибки у функції часу з урахуванням характеру виконаного маневру є системою чотирьох або п'яти (для різних типів гірокомпасу) диференціальних рівнянь, вирішення якої носить характер загасаючих коливань.

Якщо врахувати, що на судні напрям площини істинного меридіана моделюється напрямом головної осі чутливого елемента, похибки курсоказів ведуть до появи бічного лінійного зміщення судна d щодо його заданої траєкторії руху. Причому величина усунення d пропорційна сумарній інерційній похибці гірокомпасу δ_j^Σ та швидкості судна V .

Бічний зсув судна d визначається величиною ортогональної до програмної траєкторії складової швидкості судна, яка за наявності сумарної інерційної похибки δ_j^Σ аналітично виражається так:

$$V_{\perp} = V \sin \delta_j^\Sigma, \quad (7)$$

а поточне значення бічного усунення d визначається виразом:

$$d = \int_0^t V \sin \delta_j^\Sigma d\tau, \quad (8)$$

При незмінній швидкості судна V величина усунення d виражається так:

$$d = V \int_0^t \sin \delta_j^\Sigma d\tau, \quad (9)$$

Максимальні значення сумарної інерційної похибки навіть у високих широтах задовольняють співвідношенню $\delta_j^\Sigma \leq 7^\circ$, що дозволяє замість величини $\sin \delta_j^\Sigma$ користуватися значенням сумарної інерційної похибки δ_j^Σ в радіанній мірі. Тому вираз для оцінки d спрощується:

$$d = V \int_0^t \delta_j^\Sigma d\tau \quad (10)$$

Для оцінки прогнозу величини усунення d можна скористатися спрощеною моделлю формування сумарної інерційної похибки δ_j^Σ , яка передбачає миттєвий поворот судна, що з першого наближення допустимо, враховуючи великий період власних коливань стандартних гірокомпасів. В цьому випадку для опису δ_{j1}^Σ гірокомпасів з твердим маятником достатньо

системи трьох диференціальних рівнянь, вирішення якої дозволяє отримати спрощену залежність δ_{j1}^{Σ} від часу:

$$\delta_{j1}^{\Sigma} = \Delta V_N [Ae^{-mt} + Ce^{-ht} \sin(\omega_d t + \psi)], \quad (11)$$

де ΔV_N - збільшення північної складової швидкості судна, викликане маневром;

A , C і ψ - відповідно постійні інтегрування та початкова фаза, що визначаються початковими умовами;

ω_d - частота загасаючих коливань чутливого елемента;

m і h - відповідно аперіодичний член та коефіцієнт загасання.

Підставляючи у вираз (10) формулу (11), після інтегрування отримаємо аналітичну залежність поперечного лінійного зміщення для гірокомпасу з твердим маятником d_1 :

$$d_1 = V_2 \Delta V_N \left\{ \frac{A}{m} (1 - e^{-mt}) - \frac{C}{\omega_d^2 + h^2} [h(e^{-ht} \sin(\omega_d t + \psi) - \sin \psi) + \right. \\ \left. \omega_d (e^{-ht} \cos(\omega_d t + \psi) - \cos \psi)] \right\}, \quad (12)$$

де V_2 - швидкість судна після маневру.

Оцінка максимального значення лінійного усунення $d_{\max(1,2)}$ вимагає визначення відповідного моменту часу $t_{\max(1,2)}$ (або кількох) із рівняння (11):

$$\delta_{j(1,2)}^{\Sigma}(t_{\max(1,2)}) = 0, \quad (13)$$

Для рівняння (11) як початкового отримаємо рівність:

$$\sin(\omega_d t_{\max 1} + \psi) = -\frac{A}{C} e^{(h-m)t_{\max 1}}, \quad (14)$$

яке потрібно подати у вигляді зручному для вирішення методом простих ітерацій:

$$t_{\max 1} = \frac{1}{\omega_d} \left\{ \arcsin \left[-\frac{A}{C} e^{(h-m)t_{\max 1}} \right] - \psi \right\}, \quad (15)$$

Після визначення значення $t_{\max 1}$ його слід підставити у вираз для d_1 і розраховане значення є шуканим максимальним лінійним поперечним зміщенням. Розрахунки показують, що у широті 70° при $\Delta V_N = 30$ вузлів ширина смуги лінійного усунення може становити понад 4 кабельтових. Тому модуль оцінки величини лінійного усунення, його прогнозу та індикації доцільно мати у складі бортової комп'ютерної інформаційної системи синтезу навігаційної ситуації.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

1. Розглянуто основні чинники, які впливають на рівень навігаційної безпеки при плаванні судна в стислих водах, і оцінена доцільність їх урахування в бортовій комп'ютерній інформаційній системі синтезу навігаційної ситуації.

2. Запропоновано спосіб відображення навігаційної ситуації з допомогою електронної карти району плавання, який дає графічне представлення поля точності, безпечної зони судна

та ураховує величину лінійного усунення судна, що виникає після маневру.

3. Приведені аналітичні вирази, що характеризують основні чинники, які створюють ризики навігаційної аварійності.

Надалі доцільне дослідження відображення в бортовій комп'ютерній інформаційній системі синтезу навігаційної ситуації ризиків зіткнення судна з небезпечними рухомими цілями.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] Вагущенко Л.Л., *Розходження з суднами зміщенням на паралельну лінію шляху*, Одеса: Фенікс, 2013.
- [3] Jesús A., García Maza, Reyes Poo Argüelles, "COLREGs and their application in collision avoidance algorithms: A critical analysis", *Ocean Engineering*, nn. 261, pp. 1-14, 2022.
- [4] Lisowski J., "Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation", *Advances in Safety and Reliability*, Vol. 2, pp. 1285-1292, 2005.
- [5] Lisowski J. "Game control methods in navigator decision support system", *The Archives of Transport*, Vol. XVII, nn. 3, pp. 133-147, 2005.
- [6] Eriksen B-OH., Bitar G., Breivik M. and Lekkas A.M., "Collision Avoidance for ASVs Compliant With COLREGs Rules 8 and 13–17", *Front. Robot.*, 2020.
- [7] Lisowski J., "Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea", Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety, 2005, pp. 71 - 78.
- [8] 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.*, nn. 9, 2021.
- [9] Statheros T., Howells G., McDonald-Maier K., "Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques", *J. Navig.*, v. 61, nn. 1, pp. 129-142, 2008.
- [10] Huang Y., Chen L., Chen P., Negenborn R. & van Gelder P. H., "Ship collision avoidance methods: State-of-the-art", *Safety Science*, nn. 121, pp. 451-473, 2020.
- [11] Lazarowska A., "Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing", *Remote Sens*, nn.13, pp. 32-65, 2021.
- [12] Vagushchenko L., Vagushchenko A., "Graphical Tools to Facilitate the Selection of Manoeuvres to Avoid Collision", *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 3, doi:10.12716/1001.17.03.14, pp. 625-633, 2023.
- [13] Martelli M., Žuškin S., Zacccone R., Rudan I., "A COLREGs-Compliant Decision Support Tool to Prevent Collisions at Sea", *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 2, doi:10.12716/1001.17.02.11, pp. 347-353, 2023.
- [14] Пятаков В.Е., Петриченко О.О., Калюжний В.В., "Спосіб послідовного розходження судна з двома небезпечними цілями", *Автоматизація судових технічних засобів*, № 24, сс. 81-87, 2018.

- [15] Петриченко Є.А., Петриченко О.О., "Розробка суднової інформаційної системи попередження зіткнень", *Судноводіння*, Вип. 28, сс. 120-130, 2018.
- [16] Benedict K., Kirchhoff M., Gluch M., Fischer S., Baldauf M., "Maneuvering Simulation on the Bridge for Predicting Motion of Real Ships and as Training Tool in Ship Handling Simulators", *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 25-30, 2009.
- [17] Benedict K., Kirchhoff M., Gluch M., Fischer S., Schaub M., Baldauf M., Klaes S., "Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling", *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 8, nn. 1, DOI:10.12716/1001.08.01.15, pp. 131-141, 2014.
- [18] C.J. Shi, D. Zhao, J. Peng, C. Shen, "Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters", *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 105-110, 2009.
- [19] Ljacki M., "Intelligent Prediction of Ship Maneuvering", *International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 10, nn. 3, DOI:10.12716/1001.10.03.17, pp. 511-516, 2016.
- [20] Kalinichenko Y., Burmaka I., "Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/9(84), DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85839, pp. 20-31, 2016.
- [21] Калініченко Є.В., "Урахування характеристик поворотливості при розрахунку параметрів повороту судна", *Водний транспорт*. №2 (20), сс. 63 – 67, 2014.
- [22] Калініченко Є.В., "Забезпечення необхідної точності повороту судна способом переміщення його криволінійної траєкторії", *Автоматизація судових технічних засобів*, № 20, сс. 52-58, 2014.
- [23] Ворохобін І.І., Казак Ю.В., Северін В.В., *Оцінка навігаційної безпеки під час плавання суден у стислих водах*. Saarbrücken, Deutschland: – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018.
- [24] Северін В.В., "Оцінка ймовірності безпечної проводки судна стислим маршрутом", *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, V(16), Issue: 148, сс. 94 -98, 2017.
- [25] Ворохобін І.І., "Вплив закону розподілу похибки бокового відхилення на ймовірність безпечного проходження судном стислим маршрутом", *East European Scientific Journal*, №5 (33), сс. 30 - 37, 2018.
- [26] Бузовський Д.А., "Імітаційне моделювання впливу структури радіолокаційної системи оберненого типу на точність контролю позиції судна", *Судноводіння*, № 12. сс. 19 – 25, 2006.
- [27] Кондрашихін В.Т., *Визначення місця судна*. М.: Транспорт, 1989.

REFERENCES

- [1] 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.

- [2] Vagushchenko L.L., *Divergence with vessels by shifting to a parallel track line*, Odesa: Feniks, 2013.
- [3] Jesús A., García Maza, Reyes Poo Argüelles, "COLREGs and their application in collision avoidance algorithms: A critical analysis", *Ocean Engineering*, nn. 261, pp. 1-14, 2022.
- [4] Lisowski J., "Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation", *Advances in Safety and Reliability*, Vol. 2, pp. 1285-1292, 2005.
- [5] Lisowski J. "Game control methods in navigator decision support system", *The Archives of Transport*, Vol. XVII, nn. 3, pp. 133-147, 2005.
- [6] Eriksen B-OH., Bitar G., Breivik M. and Lekkas A.M., "Collision Avoidance for ASVs Compliant With COLREGs Rules 8 and 13–17", *Front. Robot.* , 2020.
- [7] Lisowski J., "Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety*, 2005, pp. 71 - 78.
- [8] Ahmed Y.A., Hannan M.A., Oraby M.Y., A. Maimun, "COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters", *J. Mar. Sci. Eng*, nn. 9, 2021.
- [9] Statheros T., Howells G., McDonald-Maier K., "Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques", *J. Navig.*, v. 61, nn. 1, pp. 129-142, 2008.
- [10] Huang Y., Chen L., Chen P., Negenborn R.R. & van Gelder P.H., "Ship collision avoidance methods: State-of-the-art", *Safety Science*, nn. 121, pp. 451-473, 2020.
- [11] Lazarowska A., "Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing", *Remote Sens*, nn.13, pp. 32-65, 2021.
- [12] Vagushchenko L., Vagushchenko A., "Graphical Tools to Facilitate the Selection of Manoeuvres to Avoid Collision", *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 3, doi:10.12716/1001.17.03.14, pp. 625-633, 2023.
- [13] Martelli M., Žuškin S., Zacccone R., Rudan I., "A COLREGs-Compliant Decision Support Tool to Prevent Collisions at Sea", *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 2, doi:10.12716/1001.17.02.11, pp. 347-353, 2023.
- [14] Pyatakov V. E., Petrychenko O.A., Kalyuzhnyi V.V., " Method of successive divergence of a vessel with two dangerous targets ", *Avtomatizatsiya sudovyh tehnycheskih sredstv*, № 24. pp. 81-87, 2018.
- [15] Petrychenko E.A., Petrychenko O.A. " Development of a ship's information system for collision avoidance ", *Sudovozhdenie*, Vyp. 28, pp. 120-130, 2018.
- [16] Benedict K., Kirchhoff M., Gluch M., Fischer S., Baldauf M., "Maneuvering Simulation on the Bridge for Predicting Motion of Real Ships and as Training Tool in Ship Handling Simulators", *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 25-30, 2009.
- [17] Benedict K., Kirchhoff M., Gluch M., Fischer S., Schaub M., Baldauf M., Klaes S., "Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling", *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 8, nn. 1, DOI:10.12716/1001.08.01.15, pp. 131-141, 2014.

- [18] Shi C.J., Zhao D., Peng J., Shen C., "Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters", *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 105-110, 2009.
- [19] Ljacki M., "Intelligent Prediction of Ship Maneuvering", *International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 10, nn. 3, DOI:10.12716/1001.10.03.17, pp. 511-516, 2016.
- [20] Kalinichenko Y., Burmaka I., "Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/9(84), DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85839, pp. 20-31, 2016.
- [21] Kalinichenko Y.V., "Accounting for turning characteristics when calculating vessel turning parameters ", *Vodniy transport*. №2 (20), pp. 63 – 67, 2014.
- [22] Kalinichenko Y.V., "Ensuring the required accuracy of vessel turning by moving its curved trajectory ", *Avtomatizatsiya sudovyh tehnycheskih sredstv*, № 20, pp. 52-58, 2014.
- [23] Vorokhobin I.I., Kazak Y.V., Severin V.V., *Assessment of navigation safety when vessels are sailing in confined waters*. Saarbrücken, Deutschland:– LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018.
- [24] Severin V.V., " Assessment of the probability of safe vessel navigation along a confined route ", *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, V(16), Issue: 148, pp. 94 -98, 2017.
- [25] Vorokhobin I.I., "The influence of the law of distribution of lateral deviation error on the probability of safe passage of a vessel along a confined route ", *East European Scientific Journal*, №5 (33), pp. 30 - 37, 2018.
- [26] Buzovskiy D.A., "Simulation modeling of the influence of the structure of an inverted-type radar system on the accuracy of vessel position control", *Sudovozhdenie*, № 12. pp. 19 – 25, 2006.
- [27] Kondrashikhin V.T. *Location of ship*. M.: Transport, 1989.