

Аналіз та алгебраїчно-символьне визначення умов безпечного руху судна у нестационарному середовищі

І. В.Тихонов, Г. Л.Баранов, В. В.Доронін, А. М.Носовський

Запропоновано метод формалізованого предикативного визначення зон безпечної та небезпечної областей навігації при впливі на рухоме судно зовнішніх факторів. Доведено умови, що під час конфліктної ситуації забезпечують гарантоване визначення безпечної траєкторії руху судна від початку маневра до повернення на плановий маршрут. Запропонований спосіб параметричного опису обмежень на пограничні умови запобігання входу у небезпечні області навігації реалізує рух по трансверсальним безпечним траєкторіям

Ключові слова: ефективна безпека, умови запобігання зіткнень, система адаптивного руху, динаміка позиціонування

1. Вступ

Математичні методи та комп'ютерні технології разом забезпечують практичну значимість результатів розв'язку актуальних задач судноводіння. Завчасність отримання рішення забезпечує спроможність встигнути виконати відповідний закон управління у межах складної динамічної системи (СДС). Підтвердженням цьому є наукові роботи [1–6]. Поточні умови плавання реально змінюються та майже випадково набувають загрозливих форм впливу зовнішнього несприятливого оточуючого середовища (ЗНОС) водний транспортний засіб (вітер, хвилювання, течії, припливи, туман, різкі зміни погодних умов, наближення до потенційно небезпечного об'єкта чи інших суден, відмова технічного засобу тощо). В залежності від фактичних обставин можливі різні наслідки раціонального реагування всіх ієрархічних підсистем СДС.

По-перше, коли ступінь небезпеки знаходиться у межах ε допуску, тоді закон управління $U(t, X, W)$, X – вектор параметрів стану керованого рухомого об'єкта, W – вектор загроз факторів ЗНОС) відповідає режимам стабілізації внутрішніх параметрів судна та кінематичному слідкуванню відносно запланованого маршруту руху на акваторії судноводіння [6, 7]. Це нормальний тривалий режим безпечної області навігації (БОН) під час експлуатації з шумами ЗНОС [8–13].

По-друге, коли судно відхиляється від запланованої траєкторії у наслідок дозволених імпульсних збурень (за рівнем визначених $f(\varepsilon, \delta)$ обмежень), тоді розв'язуються задачі гарантованого адаптивного управління (ГАУ). Це дозволяє компенсувати небажані впливи ЗНОС шляхом застосування наявних на борту енергетичних ресурсів. Після компенсації цих впливів перехідний або маневрений режим завершується і судно продовжує рух вже згідно запланованої траєкторії руху, яка є цільовою для даного рейсу [14].

По-третє, можуть виникнути ситуації, коли геометрична відстань між судном та потенційно небезпечним об'єктом вже не дозволяє попередити контактне зіткнення, як цього вимагають Міжнародні правила попередження зіткнень суден в морі 1972 року [15]. При цьому у випадку наближення до стану неминучості аварії можливими залишаються лише автоматичні режими активізації засобів екстремального рятування у небезпечній області навігації (НОН). Відомий приклад входу в НОН, коли суперлайнер «Costa Concordia» 13.01.2012 року сів на мілину на італійському узбережжі біля острова Giglio з утворенням пробоїни біля 70 м довжиною, загибеллю судна та десятків пасажирів. Матеріальні збитки у наслідок цього склали біля 2-х млрд. євро [16].

Зони підвищеного ризику плавання (ЗПРП) в морських акваторіях існують в багатьох географічних районах. Системи розподілення руху суден запроваджені відповідно до Резолюції ІМО А.572 (14) від 20.11.1985 [17, 18]. Вимоги міжнародних конвенцій, зокрема Міжнародних правил попередження зіткнень суден в морі 1972 р., а також значні зусилля закордонних та вітчизняних вчених направлені на пошук оптимальних методів управління режимами руху судна у нестационарних умовах. Але, незважаючи на це, стан аварійності на морському транспорті суттєво не змінюється. Рівень аварійності на світовому морському флоті залишається незадовільним. Саме це підтверджує, що тематика досліджень є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Світова статистика аварійних подій на транспорті, зокрема на морському транспорті за період 2010–2015 р.р., свідчить про значний рівень аварійності, незважаючи на значний розвиток технологій та багаторічну роботу вчених в напрямку безпеки. Втрати світового морського флоту за типом та причинами загибелі суден [19, 20] наведені у табл. 1, 2 і на рис. 1, 2. Відповідно до статистики, наведеної в цих джерелах, найбільша кількість суден, що загинули в морі, – неспеціалізовані суховантажні судна, найчастіші причини загибелі – втрата плавучості та посадка на мілину. Іншими словами, це безпосередній вхід судна в небезпечну область навігації (НОН) та критичний вплив на судно ЗНОС.

Таблиця 1

Втрати суден світового торговельного флоту за 2010–2015 р. за типами суден

Типи суден	Ships types	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Усього
Суховантажні	Dry cargo	60	37	61	41	31	36	266
Балкери	Bulkers	11	14	9	15	4	6	59
Пасажирські	Passenger's	3	7	7	8	10	4	39
Буксири	Tugs	7	2	6	7	7	7	36
Хімовози	Chemical tankers	5	2	8	10	2	2	29
Ро-Ро	Ro-Ro	1	3	4	2	5	4	19
Контейнеровози	Conteiner's	5	3	6	4	4	5	27
Інші типи	Other types	3	5	3	6	4	2	23

Постачальники	Suppliers	2	2	3	2	3	2	14
Баржі	Barges	1	0	0	3	1		5
Днопоглиблювальні	Dredgers	2	2	2	0	1	1	8
Танкери	Oil tankers	3	3	1	0	1	0	8
Газовози	Gas tankers	1	1	1	0	0	0	3
Усього	Grand total	104	81	111	98	73	69	536

Таблиця 2

Причини загибелі суден світового торговельного флоту у 2010–2015 р.р

Причина загибелі	Causes of Losses	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Усього
Втрата плавучості	Submerged	64	45	55	70	50	63	347
Посадка на мілину	Wrecked/stranded (aground)	23	28	26	21	18	12	128
Пожежі та вибухи	Fire/explosion	11	8	13	15	6	3	56
Пошкодження машин	Machinery damage	4	6	15	2	5	2	34
Зіткнення	Collision	10	3	5	2	2	3	25
Пошкодження корпусу	Hulldamage	4	3	6	1	4	2	20
Інші	Miscellaneous	6	1	1	1	2	0	11
Навали	Hallcontact	0	0	2	0	1	0	3
Напад піратів	Piracy	2	1	0	0	0	0	3
Втрата без вісті	Missing	1	0	0	0	0	0	1
Усього	Grand total	125	95	123	112	88	85	628

Загальні втрати суден світового торговельного флоту
за 2010-2015 р.р. по типам суден

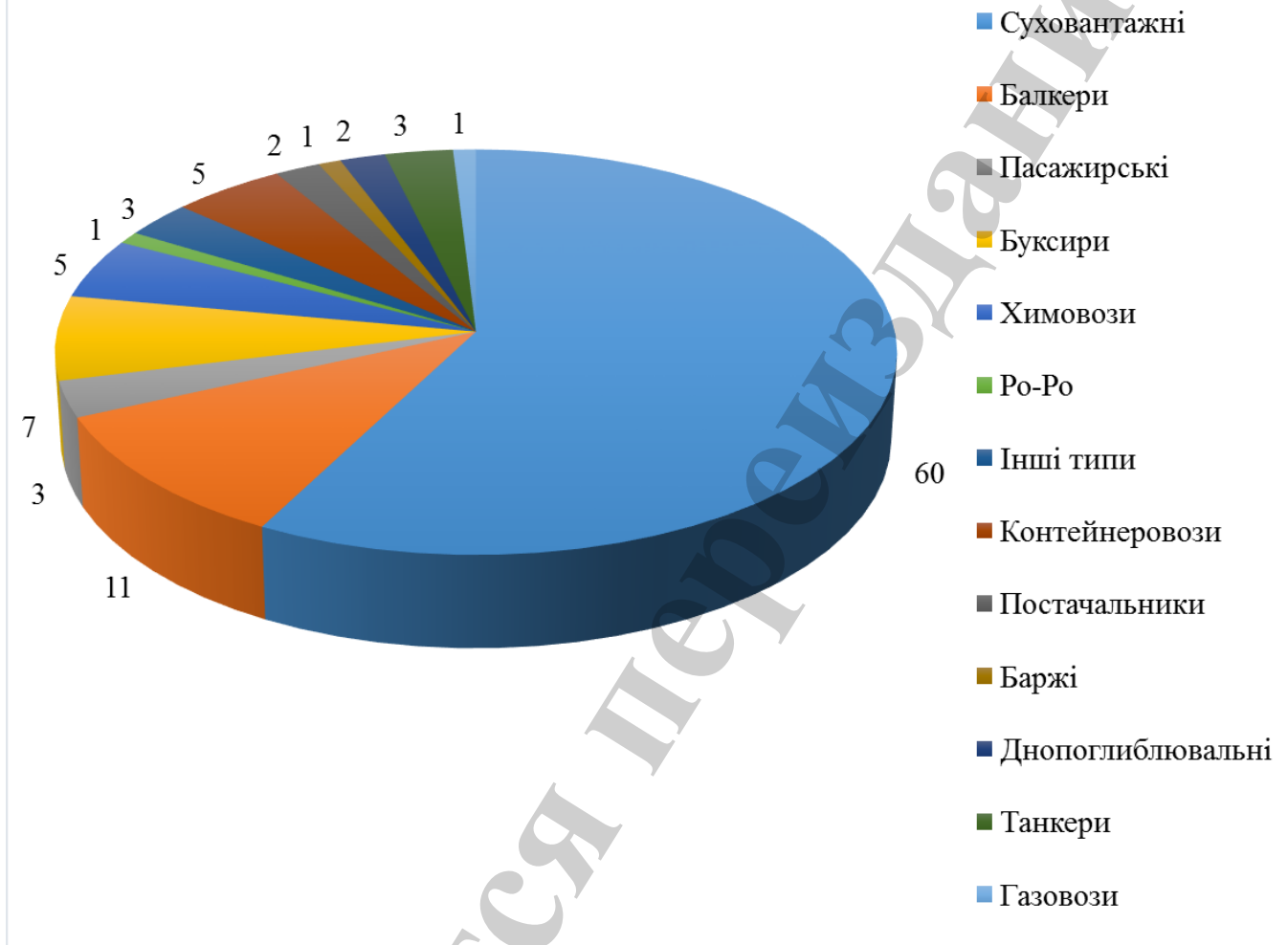


Рис. 1. Втрати суден світового торговельного флоту за 2010–2015 р. за типами суден

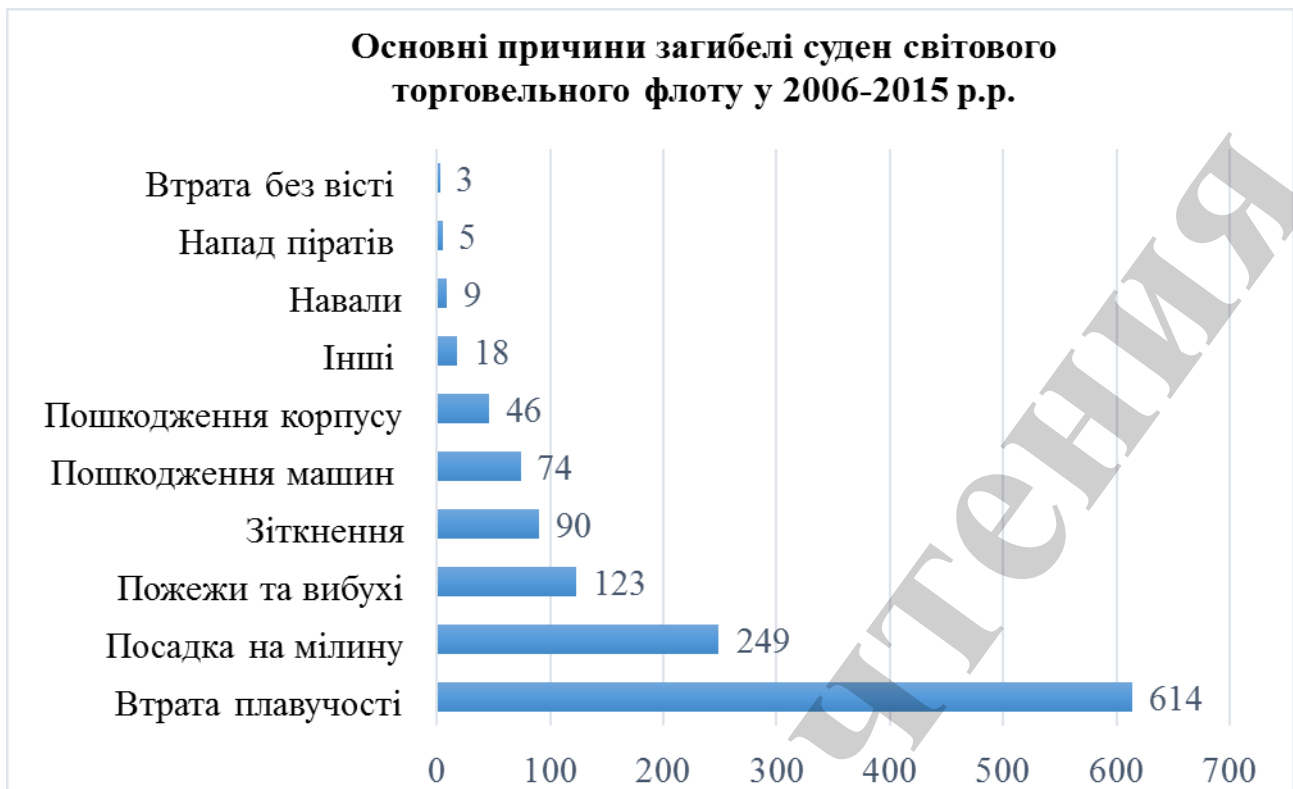


Рис. 2. Причини загибелі суден світового торговельного флоту у 2010–2015 р.

Якість ГАУ рухом суден по критеріям інваріантності до цілого класу збурень досягається засобами інтелектуальних технологій. Доцільно суттєво змінювати форми взаємодії ергатичних комплексів, насичених засобами автоматизації на базі комп'ютерних технологій [6, 8].

Відповідно до [6], теорія маневрування суден розрахована для руху судна в спокійній воді. Але на рухоме судно постійно впливають змінні фактори хвилювання, які необхідно врахувати для розрахунку своєчасного безпечного маневра.

Відповідно до [8], у результаті інтерференції хвиль виникає складна система пагорбів і западин. Судно відчуває неупорядковану хитавицю, окремі хвилі можуть досягати гігантських розмірів та з'являтися з найнесподіваніших сторін. Якщо судно попадає на гребінь такої хвилі лагом до вітру, з'являється висока вірогідність втрати остійності та перекидання судна. Для запобігання подібних аварійних подій потрібна детальна поточна інформація про всі складові інтерференції системи хвиль (середньої довжини, швидкості фази відносно судна, тощо), а також прогноз про можливу появу особливо великої хвилі по курсу судна.

Крім того, відповідно до [1], аналіз Nomoto Gain и параметри маневрування судна Norbin дозволяють системі управління здійснювати завчасні маневри лише для малошвидкісних суден.

Відповідно до [2], практичне використання роботизованих надводних та підводних апаратів суттєво залежить від погодних умов, в першу чергу, від ро-

зміру та нерегулярності хвилювання. Питання щодо руху судна у неоднорідному хвильовому середовищі також не вирішене.

Відповідно до [4], незважаючи на перспективні новаторські роботи з розробки нових видів авторульових для суден, промисловість за економічними причинами не запроваджує більш складні та коштовні конструкції контролерів для авторульових. Тому актуальним є питання щодо розробки більш надійних та відносно дешевих алгоритмів відпрацювання команд для компенсації впливу зовнішніх факторів.

Відповідно до [9], в останні десятиріччя дослідження проводилися в сфері інтегральних методів, які добре працювали в двох вимірах. Але при цьому виникали складнощі у розширенні точності результатів досліджень до трьох вимірів, особливо в умовах турбулентності.

Відповідно до [21], адаптивний контролер зворотного зв'язку в блоках управління вхідними даними рухомого об'єкта має тільки один параметр для оновлення інформації. При цьому за наявності лише одного параметру контролер обмежений у можливості прийняття рішення невідомих підсистемних функцій за усіма обмеженнями.

Сучасні інтелектуальні інтегровані технології судноводіння працюють на принципах дискретизації та алгебраїзації множин варіюємих змінних аргументів, наприклад для інваріантності ГАУ рухом конкретного i -го судна. Вони суттєво змінюють функції взаємодії комп'ютерних машин з інтелектуальними агентами системи (IAS) в полієргатичній технологічній організації (ПЕТО) [22].

Гарантована активна безпека руху судна в ЗПРП при загрожуючих факторах НОН _{j} реалізує три категорії захисту судноводіння без зіткнень і катастроф.

Перша категорія ПЕТО гарантує стратегічну ефективність транспортної роботи за рахунок планування, оптимізації, забезпечення прибутковості маршруту з врахуванням кожної ЗПРП, вірогідності штормової погоди, специфіки впливу конкретних факторів ЗНОС. Прогнозуються надійні варіанти завчасного уходу в безпечні акваторії.

Друга категорія ПЕТО гарантує тактичну живучість, а також повноту ресурсного забезпечення на реалізацію маневрених переходів з НОН в безпечну область навігації (БОН). В цьому випадку гарантується, що НОН достатньо надійно ідентифікується стосовно граничних параметрів у просторі конкретних загроз ЗНОС. В цьому випадку гарантується, що НОН достатньо надійно ідентифікується—стосовно граничних параметрів у просторі конкретних загроз ЗНОС). За цих умов обов'язково мінімізуються затрати ресурсів на вхід до БОН _{j} , яка дозволяє після тактичного маневру повернутися в БОН _{i} для завершення планового стратегічного переходу в порт призначення.

Третя категорія ПЕТО поки ще не гарантує оперативну швидкість реалізації законів ГАУ рухом судна без аварійних подій. В кожній конкретній акваторії паралельно йде реалізація задач перших двох категорій. Функціональна швидкість в варіативних БОН _{ij} та НОН _{j} за умов наближеного сусідства зон i та j на прямокутній решетці зон i та j при $\forall j \in N$ складає на прямокутній решетці $\forall (i,y) \in N$ факт $j \in J$, ичний маршрут даного рейсу в усіх нестационарних умовах плавання.

Функціональна швидкість в варіативних $БОН_{ij}$ та $НОН_j$ за умов наближеного сусідства зон i та j на прямокутній решетці зон i та j при $i \in J, \forall j \in N$ складає на прямокутній решетці $\forall (i, y) \in N$ фактичний маршрут даного рейсу в усіх нестационарних умовах плавання).

Просторово-часової континуум (ПЧК) для кожного рівня гарантованої активної безпеки руху судна має суттєву особливість та специфіку моделей, на основі яких виконуються своєчасні розрахунки та рішення ключових задач даної категорії. Відповідно до Міжнародної конвенції про безпеку людського життя на морі [23] та Резолюції Міжнародної морської організації (ІМО) MSC.282 (86) від 05.06.2009 р., замість паперових карт всі категорії морських суден оснащуються програмно-апаратними комплексами типу ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) [24]. Але процес планування маршруту рейсу відповідно до резолюції ІМО А.893(21) [7] до цього часу залишається не автоматизованим. Ускладнення усіх технічних, технологічних і ергатичних форм взаємодії для досягнення рівня гарантованої безпеки руху судна при зближенні з НОН, де вже існує позаштатна загрожуюча ситуація (ПЗС), вимагає інноваційних форм обслуговування судноводіння в критичних екстремальних умовах [5, 8].

Перелік і райони можливого проявлення НЗС складаються для кожної реальної ЗППП, обхід якої гарантує судноводіння без аварій і катастроф. Точне, своєчасне позиціонування геометрії ПЧК для ПЗС і ЗППП на електронних картах засобами модернізованого ECDIS дозволяє адекватно реагувати і коригувати базовий K -й маршрут $БОН_{K-1} \Rightarrow БОН_K \Rightarrow БОН_{K+1}$ з перехідними ділянками $БОН_{ij}$ альтернативних маневрених траєкторій.

Точне, своєчасне позиціонування геометрії ПЧК для ПЗС і ЗППП на електронних картах засобами модернізованого ECDIS дозволяє адекватно реагувати і коригувати базовий K -й маршрут $БОН_{K-1} \Rightarrow БОН_K \Rightarrow БОН_{K+1}$ з перехідними ділянками $БОН_{ij}$ альтернативних маневрених траєкторійю.).

Роль стратегічного управління відображає поетапна характеристика K -го маршруту до наближення з обходом $НОН_j = ПЗС \cup ЗППП$ у вигляді

$$БОН_K \Rightarrow \dots \Rightarrow БОН_{i-2} \rightarrow БОН_{i-1} \rightarrow БОН_i \rightarrow \\ \rightarrow \{БОН_{ij} \rightarrow БОН_{K-p}\} \rightarrow БОН_{K-(p+1)} \rightarrow \dots \Rightarrow БОН,$$

де ПЗС – позаштатна загрожуюча ситуація; у $\{БОН_{ij} \rightarrow БОН_{K-p}\}$ реалізується маневр та залишок маршруту продовжується за запланованою траєкторією до безпечного прибуття у порт призначення.

Замість $НОН_{i+1} = (ПЗС \cup ЗППП)_{i+1}$ судноводіння задовольняє альтернативно-ситуативним маршрутом $\{БОН_{ij} \rightarrow БОН_j\}$, який гарантує відсутність перетинів і входження до НОН за нормативними правилами. Слід підкреслити, що БОН при усіх варіантах реалізується зі швидкостями руху, що задовольняє графік поетапної реалізації рейсу $БОН_N \Rightarrow БОН_K$ з програмно-оптимальним маршрутом [7].

Таким чином, якщо при реалізації рейсу судна заданим плановим маршрутом параметри НОН задовільняють критеріям класифікації як нормативним, рух судна виконується по етапам БОН цього плану. В усіх інших випадках ситуація класифікується як потенційно небезпечна «EXCEPTION: interrupt».

Сенс цього типу класифікації особливої ситуації полягає в перериванні попереднього планового БОН_i режиму судноводіння і переходу на інший БОН_j робочий режим, наприклад, по причині «no good weather») [8, 25].

3. Ціль і задачі досліджень

Ціль досліджень полягає у оперативному визначенні трансверсальних перехідних траєкторій руху судна в ЗПРП шляхом актуалізації роботи паралельних базових засобів інформаційно-управляючих підсистем в єдиній автоматизованій системі навігації та управління рухом суден. При цьому повинна гарантуватися безпека судна, завершення циклу транспортної роботи та екологічна безпека за рахунок виключення аварій, зіткнень та збереження життя і здоров'я людей в акваторіях судноводіння.

Для досягнення цілі дослідження були поставлені такі задачі:

- алгебраїчно та предикативно визначити умови трансверсальних (без перетину, зіткнень, контакту) перехідних траєкторій у режимов збігу обставин ЗНОС, які потребують маневрування засобами оперативного управління суден як інерційних об'єктів у ПЧК;

- розробити технологічні процеси алгоритмічного символічного опису початкового та кінцевого (проміжного) стану позиції судна на інтервалі реалізації безпечного локального маневру;

- обґрунтувати ефективність безпечних локальних маневрених процесів запобігання усіх визначених колізій без входу в небезпечні області навігації у маршрутному просторі.

4. Матеріали та методи дослідження

Методологічна сутність алгебраїчно-символьної формалізації спрямована на реальне досягнення ефективної безпеки плавання судна та життя людей на ньому. Це здійснюється за рахунок упередженого спостереження у ПЧК з координатами x , y , t прогнозних Δx та Δy зон маршруту $P(x+\Delta x, y+\Delta y, t_i + \Delta t)$ відносно поточної позиції $P(x_i, y_i, t_i)$ місцезнаходження рухомого судна. При цьому враховуємо, що у разі знаходження судна в умовах активного впливу факторів нестационарного ЗНОС зростають ризики опинитись у аварійному (передаварійному) стані.

Причини цьому (для ЗПРП) – складність [26–29], яка обумовлена наступними ключовими властивостями сучасних практичних навігаційних задач: (БОН_{к-1} ⇒ БОН_к ⇒ БОН_{к+1}).

- часова складність вложений підінтервалів у T_0 $\tau_j \in t_j \in T_j, \forall j = \overline{1, L}, J \in N$ життєвих циклів різнотемпових багатьох паралельних процесів, що взаємозалежні від різнотемпових часових попередніх та поточних станів учасників динамічної ситуації;

– часова складність вложений підінтервалів у T_0 , $\tau_j \in t_j \in T_j$, $\forall j = \overline{1, L}, J \in N$ життєвих циклів різнотемпових багатьох паралельних процесів, що взаємозалежні від різнотемпових часових попередніх та поточних станів учасників динамічної ситуації;

– просторова тривимірна складність x_i, y_i, z_i , $\forall i = \overline{1, K}$ конфігураційного ПЧК з розташуванням великої кількості різноманітних факторів впливу та рухомих 3D об'єктів на результуючі динамічні події багатовимірного простору;

– просторова тривимірна складність x_i, y_i, z_i , $\forall i = \overline{1, K}$ конфігураційного ПЧК з розташуванням великої кількості різноманітних факторів впливу та рухомих 3D об'єктів на результуючі динамічні події багатовимірного простору;

– алгоритмічна складність (інформаційно-обчислювальна кількість операцій ЕОМ) $C_k(t, X)$, $\forall k = \overline{1, N}$ у наслідок неформалізованих евристичних понять та ситуаційних моделей з лінгвістичними змінними та за різних ситуативних причин з невизначеними параметрами;

– алгоритмічна складність (інформаційно-обчислювальна кількість операцій ЕОМ) $C_k(t, X)$, $\forall k = \overline{1, N}$ у наслідок неформалізованих евристичних понять та ситуаційних моделей з лінгвістичними змінними та за різних ситуативних причин з невизначеними параметрами);

– інтеграційна складність комбінування $I = \sum_{l=1}^M I_l(C_{kl})$, $\forall j = \overline{1, M}$ об'єктів з великою кількістю ієрархічних рівнів взаємодії на горизонтальних та вертикальних шарах, включаючи міжшарові структурно-функціональні взаємозалежності [5, 30–32];

– інтеграційна складність комбінування $I = \sum_{l=1}^M I_l(C_{kl})$, $\forall j = \overline{1, M}$ об'єктів з великою кількістю ієрархічних рівнів взаємодії на горизонтальних та вертикальних шарах, включаючи міжшарові структурно-функціональні взаємозалежності [5, 30–32].

Відсутність єдиної формальної моделі ефективності СДС обумовила застосування класичного підходу декомпозиції складного на більш прості частки (компоненти, елементи). Кожну СДС декомпозуємо на спрощені підсистеми (Мета – , Макро – , Мікро – складові), між якими фіксують взаємодію.

Часову складність декомпозуємо на життєві цикли, класи ситуацій, режими роботи, фазові перехідні процеси, імпульсні збурення. Вкладені інтервали різнотемпових процесів інтегруємо у єдиній складній динаміці з універсальною віссю часу та єдиним еталоном.

Просторову складність декомпозуємо на задачі визначення сфери впливу, зони обслуговування, сектори специфіки впливу, локальні області взаємодії з урахуванням реальних геометричних параметрів фігур та відстаней [10].

Алгоритмічну складність ПЧК та СДС декомпозуємо на окремі типові логічні схеми алгоритмів. Фіксуємо обміни даними між ними відповідно до визначених умов переходів на вузлові інші логічні схеми алгоритмів. Це здійснюється у межах загального графа інтегрованого алгоритму розв'язання складної задачі [1, 3–5].

З урахуванням вищезазначеного підготовлено варіанти часової діаграми розвитку подій для пари суден, траєкторії яких за прогнозом у момент часу

найменшого зближення T_A безпечні та мають небезпечну спільну точку перетину (зіткнення) (рис. 3).

Зробимо пояснення:
значення простору:

ΔX_{\min} – найменша дистанція наближення, з якої починається реалізація ГАУ судном згідно визначеного закону маневрування $U(t, X, W)$;

$\lim \Delta X(t)$ – природний закон некерованого руху за інерцією;

ΔX_{\inf} – найменша допустима дистанція наближення;

ΔX_{\max} – дистанція безпечного віддалення від зіткнення;

ΔX_{\sup} – безпечна дистанція з урахуванням загрожуючих факторів зовнішнього впливу (вітер, хвилі, ...)

покрокові i часові інтервали, які характеризують безпечний цільовий варіант з ухиленням від зіткнення (рис. 3, б):

T_{Sm} – час, коли зміна режиму роботи двигуна та рульової машини повинні завершитися;

T_{fm} – час, коли у результаті зміни режиму роботи двигуна та рульової машини судно завершило маневр та минула ситуація небезпечного наближення;

T_g – час, коли судно після звершення маневру знаходиться в безпечній дистанції з урахуванням загрожуючих факторів зовнішнього впливу (цільовий момент - goal);

T_A – час, коли судно повністю завершило маневр та повернулося на запланований маршрут;

$T_{Sm} - t_0 = \sum_{i=1}^l \Delta \tau_i$ – починаючи з моменту t_0 початку активізації задачі тривалість

послідовних кроків, що за причин ΔX_{\min} витрачені на здійснення:

($i=1$) – упередженого прогнозування майбутніх подій до моменту T_A ;

($i=2$) – аналіз ситуації та варіантів запобігання зіткнень шляхом маневрування, що пропонуються;

($i=3$) – прийняття рішення та вибір схеми маневрування;

($i=4$) – процеси до моменту часу T_{Sm} , які характеризують, що зміни режимів роботи головного двигуна судна та рульової машини завершилися;

$T_{fm} - T_{Sm} = \sum_{j=1}^m \Delta \tau_j$ – тривалість послідовних m кроків, що за причин тенденції

$\downarrow \Delta X_{\inf} < \Delta X_{\min}$ витрачені на здійснення процесів активного маневрування та адаптивного управління законами зміни курсу та швидкості судна, у наслідок яких попередня тенденція змінена на протилежну тенденцію $\uparrow \Delta X_{\max}$ у момент часу T_{fm} , коли завершена фаза ухилення від зіткнення [5, 10];

$T_g - T_{fm} = \sum_{k=1}^n \Delta \tau_k$ – починаючи з моменту T_{fm} до цільового моменту T_g (goal,

$\uparrow \Delta X_{\sup}$) здійснюються n кроки повернення руху судна на реалізацією запланованого маршруту та продовження контролю даної пари суден.

У разі виникнення нових небезпечних факторів відлік часу починається знову з моменту t_0 і виконуються ситуативні алгоритми забезпечення постійного знаходження в БОН згідно запланованого маршруту та попередження зіткнення [12].

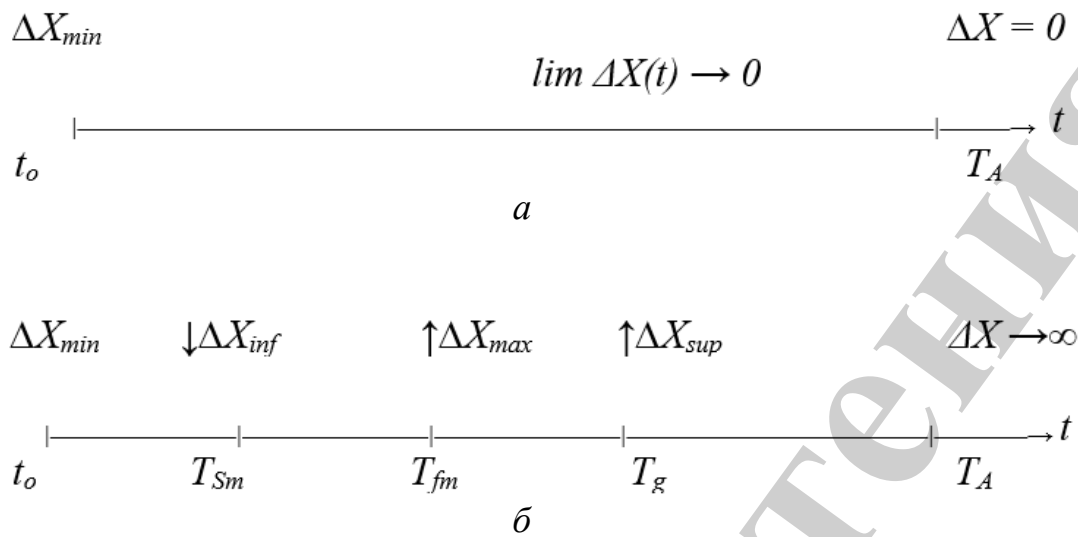


Рис. 3. Часовий прогноз розвитку подій для пари суден, що наближуються: *a* – варіант без реалізації маневру з ухилення, унаслідок чого зіткнення буде у момент T_A ($\Delta X=0$ відстань між бортами обох суден) [15]; *б* – своєчасна реалізація маневру з ухиленням та запобіганням зіткнення.

5. Результати дослідження маневрених рухів

5. 1. Алгоритмічні перетворення в інтелектуальних системах навігації та управління рухом суден

Кожен алгоритм за критеріями ПЧК та СДС формалізуємо [5, 23, 24] виконується за наступними кроками.

Крок 1. Математична модель емпіричного об'єкту дослідження (явища або процесу) є сукупністю накопичених та зафіксованих знань, фактів, аргументів, аксіом (припущень). Часткові моделі дозволяють побудувати цілісну, логічну, бездоганну й несуперечливу структуру, що відображає основні, ключові властивості об'єкта СДС.

У межах цілеспрямованого вимірювального експерименту об'єкти та математичні моделі неповністю тотожні. Математична модель лише заміщує складний природний об'єкт. Спрощена математична модель працює (у межах засобів моделювання) незалежно від самого реального об'єкта. Саме це забезпечує швидкість одержування результатів вимірювань під час моделювання. Тому ключовим процесом є контроль похибок на кожному етапі моделювання СДС. Особлива увага до безпомилковості необхідна при визначеності заданої множини X , яка складається з базових елементів $x_i \in X, \forall i = \overline{1, n}$ – конструктивних деталей непорожньої сукупності. Згідно відбору та групування однорідних за властивостями елементів множини X можливо скласти різні класи C об'єктів (точок) як відповідної \mathcal{Z} підмножини. Відкрита множина простору C складається з елементів даної сукупності та пустої множини. Певне об'єднання заданих відкритих множин називають топологією простору C або топологічною струк-

турою. Топологією \mathfrak{T} будується система околів. При цьому окіл $U \in \mathfrak{T}$ є околком точки $x_i \in X$ з позначенням $U(x_i) \in \mathfrak{T}$ якщо $x_i \in U$.

Крок 2. Пара (X, \mathfrak{T}) множин називається топологічним простором, якщо виконані такі умови:

$$(\forall x_i \in X)(\exists U \in \mathfrak{T}): x_i \in U, \quad (1)$$

$$(\forall x \in X)(\forall U(x), V(x) \in \mathfrak{T})(\exists W(x) \in \mathfrak{T}): Wx \subseteq U(x) \cap V(x). \quad (2)$$

Тоді дві різні точки простору стають розділені (розрізнені) в топології \mathfrak{T} за допомогою околів. Це отримано у наслідок того, що кожна пара точок хаусдорффового простору (X, \mathfrak{T}) має околиці, що не перетинаються.

Крок 3. Хаусдорфовим топологічний простір (X, \mathfrak{T}) буде тоді, коли крім умов (1) та (2) означення (2) доповнюють додатковою умовою

$$(\forall x, y \in X, x \neq y)(\exists U(x), U(y) \in \mathfrak{T}): Ux \cap Uy = \emptyset. \quad (3)$$

Крок 4. Підсімейство $(B \subset \mathfrak{T})$ відкритих множин називаються базою топології \mathfrak{T} , якщо кожний елемент з \mathfrak{T} можливо подати у вигляді об'єднання із B .

Крок 5. Метричний простір для класу C об'єктів (точок (x, y, z, \dots)) встановлює правила для кожної пари точок $x, y \in C$ ПЧК, якщо визначено дійсне число $d(x, y)$ (як метрика відстані між x та y) таке, що

$$d(x, y) = 0, \quad \forall x \in y, \quad (4)$$

$$d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y).$$

Таким чином для всіх елементів x та y із C виконується нерівність трикутника та властивості міри $d(x, y) \geq 0, d(x, y) = d(y, x)$ та симетрії.

Вище вказані міри забезпечують відображення (перетворення, відповідність, операція, функція $x \rightarrow x' = f(x)$) при побудові математичної моделі в області зображень відносно реальних природних (фізичних) об'єктів в області оригіналу. Міра (3) та (4) може бути застосована для фізичних величин: довжина, площа, об'єм, маса, сила, тиск, відстань, та ін. Це приклади тільки невід'ємного значення. На шкалі з означенням нульового положення необхідно враховувати також від'ємні значення. Ці протилежні фізичні величини можливо формалізувати. Наприклад, електричний заряд $\pm q$ може характеризувати рухом атомів та електронів навколо власного ядра з зарядом.

Крок 6. Дійсна функція q , яка задана в просторі X на σ алгебрі підмножин вимірному простору за допомогою $q(A) \in \mathfrak{R}$ множини дійсних чисел на прямій називається зарядом, якщо використовуються такі умови:

$$q(\emptyset) = 0,$$

$$q(\sum_{j=1}^{\infty} A_j) = \sum_{j=1}^{\infty} q(A_j),$$

$$a = (A, \Omega_F, \Omega_p),$$

де a – алгебраїчний об'єкт, для якого A – носій алгебраїчних системи не нульової множини елементів з множинами Ω_F функцій (операцій на A) і предикатів (логічних відношень на A). Функція заряду $\pm q$ злічена та адаптивна, причому невід'ємні та від'ємні підпростори не перетинаються.

Крок 7. Вимірним топологічним простором з зарядом q називаємо трійку (X, \mathfrak{z}, q) для безпомилкового визначення (опису та моделювання) [3, 5].

Математична задача вимірювань для відображення фактичних процесів руху судна при участі систем навігації та управління рухом по кожній ЗППІ має дві складові.

Перша складова – формулює та описує відомий взаємозв'язок (взаємозалежність) усіх математичних моделей об'єктів процесу вимірювань. При цьому включаємо такі часткові завдання: значення параметрів, структури, початкових та граничних умов областей існування та конкретні обмеження на витрати, ресурси, механізми.

Друга складова – формування типових тривіальних підзадач, що треба покрово розв'язати. При цьому визначаємо почерговий набір шляхом доведення можливої похибки і гарантованої оцінки якості результату. Для більшості задач практики відповідь, яка задовольняє вимогам та сформульованим (ініційованим, актуалізованим) запитання, кома міститься в неявній формі у постановці самої задачі [2, 3, 6–8, 14, 21, 25]. Тому для запобігання конструктивній обчислювальній якості алгоритму додатково треба виконати необхідні перетворення в явну форму.

5. 2. Регулювання безпечного стану судна, що рухається у неоднорідному хвильовому середовищі

Під час плавання судна в морі в штормову погоду на корпус судна діють різноманітні негативні динамічні фактори впливу хвилювання. Це: резонанс при хитавиці, розташування судна на двох гребнях хвиль, зона турбулентності, удари особливо великих хвиль, а також штормових хвиль, яка виникає під час впливу декількох систем хвилювання (вітрова, брижі, різні напрями хвиль [3, 4, 9, 11, 19, 21, 25]).

У загальному випадку неоднорідності середовища змінити не можна. Необхідно на самому об'єкті створити адаптивну систему, яка в процесі руху реагувала б на безперевні зміни параметрів середовища.

Під час плавання по запланованій траєкторії необхідно заздалегідь знати очікувані неоднорідності. Синтезуємо систему управління за критерієм чутливості судна до перешкод для руху в неоднорідному середовищі.

Неоднорідність середовища представляють як просторово-часове випадкове поле. Тому першим етапом є отримання в реальному масштабі часу інфор-

мації про просторовий розділ неоднорідностей для будь-якого моменту часу, тобто послідовності реалізації замороженого поля.

$$Q(t) = Q(\rho, t); \rho = \{x, y, z\}. \quad (5)$$

Якщо до кінця часу регулювання поле незначно змінило свою структуру, тобто залишилося практично замороженим, то тимчасових змін поля можна не враховувати, а оперувати тільки просторовими характеристиками. Ступень замороженого поля можна оцінювати величиною відносини середнього квадрату значень поля в моменти часу t і $t+T_p$ до дисперсії поля

$$\begin{aligned} & \frac{[Q(\rho, t) - Q(\rho, t+T_p)]^2}{Q^2(\rho, t)} = \\ & = \frac{Q^2(\rho, t) - 2Q(\rho, t)Q(\rho, t+T_p) + Q^2(\rho, t+T_p)}{Q^2(\rho, t)} = 2[1 - R(T_p)]. \end{aligned} \quad (6)$$

Кореляційні функції таких геофізичних полів як морське хвилювання добре апроксимуються експоненційною залежністю.

$$R(\tau) = \exp\left(-\alpha \frac{\tau}{\Delta T_k}\right); \quad R(T_p) = \exp\left(-\alpha \frac{T_p}{\Delta T_k}\right), \quad (7)$$

де $R(\tau)$ – часова кореляційна функція поля неоднорідностей середовища, ΔT_k – інтервал часу кореляції.

Умови залежності можна записати у вигляді

$$T_p / \Delta T_k \ll 1. \quad (8)$$

При цьому, чим більше судно, тим постійна часу регулювання T_p збільшуватиметься. Тоді умова (8) може не виконуватися для масивних суден. Тому другим етапом для забезпечення адаптації об'єктів до збурень середовища треба мати часові виміри – оцінки випадкового поля хвилювання. Прогнозування полегшується тим, що часові μ і просторові K частоти одних і тих же спектральних складових хвилювання пов'язані дисперсійним співвідношенням

$$\mu^2 = gK, \quad (9)$$

де g – прискорення сили тяжіння.

Якщо вдалося отримати для деякого часу t двовимірну просторову реалізацію піднесенень хвильового рельєфу $z(x, y, t)$. Здійснимо двовимірне перетворення Фур'є над отриманою реалізацією рельєфу хвиль у вигляді суми всіх плоских спектральних складових

$$\begin{aligned} z(x, y, t) = \\ = \sum_i \sum_j a_{ij} * \cos[K_i(\cos Q_j + y \sin Q_j) - \mu_i t - \varepsilon_{ij}], \end{aligned} \quad (10)$$

де Q_j – напрямок спектральної складової щодо осі x ; a_{ij} – амплітуда елементарної площини хвилі.

Ця амплітуда може бути виражена через спектр амплітуд комплексного спектра, або енергетичний спектр

$$a_{ij} = \sqrt{2S_z(K_i; Q_j)} \Delta K H Q.$$

З дисперсійних відносин випливає, що кожна спектральна складова довгої хвилі $\Lambda_i = 2\pi/\mu_j$ має відповідну швидкість поширення

$$C_i = \frac{\Lambda_i}{T_i} = \frac{2\pi}{K_i} / \frac{2\pi}{\mu_j} = \frac{\mu_j}{K_i} = \sqrt{\frac{g}{K_i}}. \quad (11)$$

Змінюємо в часі складові фази $\phi_i = \mu_i t$. Це може бути виражено через хвильове число $K_i \phi_i = (gK_i)(gK_i)^{\frac{1}{2}} t$ як просторову характеристику.

Для прогнозування підвищень рельєфу хвиль на момент часу $t + \Delta t$ кожній спектральній складовій необхідно задати додатковий зсув фаз

$$\Delta \phi_i = (gK_i)^{\frac{1}{2}} \Delta t.$$

Отримуємо спектр рельєфу для моменту часу $t + \Delta t$:

$$\begin{aligned} z(x, y, t + \Delta t) &= \\ &= \sum_i \sum_j a_{ij} * \cos \left[K_i (\cos Q_j + y \sin Q_j) - (gK_i)^{\frac{1}{2}} (t + \Delta t) - \varepsilon_{ij} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Здійснюємо зворотне перетворення Фур'є, у результаті якого отримуємо шуканий рельєф хвиль $z(x, y, t + \Delta t)$.

Схематично послідовність операцій з отримання прогностичного рельєфу можна записати у вигляді такої послідовності:

$$\begin{aligned} z(\rho t) &\rightarrow F \{ z(\rho t) \} \rightarrow s \downarrow (Z) \uparrow (iK, Q, t) \rightarrow s \downarrow (Z) \uparrow (iK, Q, t + \Delta t) \rightarrow \\ &\rightarrow F^{-1} \{ S_z(iK, Q, t) \} \rightarrow z(\rho t + \Delta t). \end{aligned} \quad (13)$$

Таким чином, якщо здійснити операції (12) та (13), то можна через час Δt прогнозувати значення підвищень рельєфу хвиль в будь-які точки $\rho(x, y)$.

Очевидно, для якісного регулювання необхідна послідовність реалізації

$$z[\rho, t + \Delta t (0 < \Delta t < T_n)].$$

Прогнозування всього рельєфу хвиль в околицях траєкторії судна дає можливість передбачити виникнення особливо великих хвиль. Без прогнозу аварійних ситуацій не можливо вжити попереджувальні заходи.

5. 3. Оцінювання ефективності етапів операційного плану під час руху суден в районах в зонах підвищеного ризику плавання

Побудова функціонально стійких СДС [5, 10, 31] вимагає розрахункової методики. Вона повинна об'єктивно надавати оцінку ступеня ефективності та коефіцієнту стійкості чітко визначеної структурно-функціональної підсистеми ГАУ з засобами керування рухом судна. Навігаційне забезпечення рухомих суден для визначення місцеположення у координатно-часовому просторі керованих станів базується на ключових поняттях [1] у вигляді наступних чотирьох множин.

1. Оперативний план (ОП) маневрування, уникнення зіткнень, динамічних змін у ЗПРП складається з чисельної кількості обґрунтованих етапів або відповідних послідовних кроків

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_l, \dots, p_l\},$$

де кожен крок $p_i, \forall_i = \overline{1, l}$ плану ℓ – загальна кількість кроків конкретного плану динамічного маневрування.

Термінальні значення параметрів стану (просторові, часові, фізичні, технологічні, технічні тощо) складаються у визначений T інтервал часу або фрагмент ОП на майбутній прогностичний період роботи судна у визначеній зоні руху [5, 25, 31].

2. Дії динамічних функцій, які необхідно виконувати для реалізації конкретного кроку, як переходу від попереднього стану ОП до наступного, за інтервал часу $\Delta t \ll T$ перехідного процесу динамічного позиціонування в цілому складають наступний набір типових операцій

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_m\},$$

де m – загальна кількість операцій $d_i, \forall_i = \overline{1, m}$ закону управління робочими органами судна у межах конкретного етапу ΔT_j з отримання кінцевого термінального ефекту.

3. Ресурсоздатність виконавців IAS та гарантована логістична забезпеченість, яка спроможна здійснити необхідні операційні дії за рахунок синергетичної взаємодії між наступними IAS

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n\},$$

де n – кількість конкретних IAS з відповідними джерелами конкретних власних ресурсів, які разом здатні забезпечити якість спільної операційної дії у визначений інтервал часу T даної зони обслуговування.

4. Ефекти оптимального маневрування судна у відомій ЗПРП визначаються у порівнянні з варіантом не адаптивного навігаційного забезпечення за старими технологіями. Суттєве зменшення ризику зіткнень шляхом запобігання кризових подій у СДС дозволяє отримати наступну множину оцінок ефективності:

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_k\},$$

де k – кількість позитивних ефектів, що є додатковими за рахунок багатомірного синергетичного real-time управління та мінімізації витрат ресурсів IASs по кожному кроку або етапу ще не реалізованого плану [22, 25, 31].

Методику оцінювання ефективності будь-якого ОП, яка полягає у алгебраїзації відношень між цими множинами з метою навігаційного забезпечення суден, запропоновано проводити за наступними етапами.

1) Відношення надійності та якості взаємозв'язків Fuzzy sets між етапами ОП та відповідними діями D визначаємо за методом L. Zadeh [28, 29, 32] у вигляді:

$$F: P \times D \rightarrow [0,1], \quad (14)$$

де $[0,1]$ – універсальний інтервал для оцінювання у відносних одиницях ступеню залежності між елементами $(P \times D)$ множин.

2) Аналогічним чином функцію взаємозв'язків між лінгвістичними змінними D та R встановимо у наступному аналітичному вигляді:

$$\phi: D \times R \rightarrow [0,1], \quad (15)$$

де $\phi(d_j, r_s), \forall d_i \in D, r_s \in R$ – міра належності або ступінь сумісності ресурсоспроможності конкретної інформаційної автоматизованої системи з операційними діями під час виконання бортовим багатофункціональним комплексом перехідного процесу ОП зі зміною функціональних станів, для визначення чисельних значень оцінок.

3) Формалізовані аналітично та задані інформаційно-знакові відношення (14) та (15) зводяться у відношення в вигляді:

$$\Omega: P \times R \rightarrow [0,1], \quad (16)$$

де $[0,1]$ – універсальна шкала, яка характеризує відносну функцію належності зі значеннями оцінок $\mu(p, r), \forall p_i \in P, r_s \in R$, які розраховуються для кожної пари p_i та r_s .

4) Отриману множину оцінок доцільно кваліфікувати шляхом розбиття на два окремих класи. Межа між цими класами визначається умовою:

$$k \leq M_e \left(\sum_{s=1}^n (r_s) \right) + \frac{\sum_{s=1}^n r_s - M_e \left(\sum_{s=1}^n r_s \right)}{\sum_{s=1}^n r_s}. \quad (17)$$

Даний вираз дозволяє судновому автоматизованому комплексу визначати найважливіші складові ОП. Нерівність (17) забезпечує функціональну стійкість за рахунок об'єднання найбільш ефективних джерел різних інформаційних автоматизованих систем.

Наявність так званих «вузьких» елементів може бути переглянута у певних частинах ОП за рахунок виключення та використання інших більш привабливих учасників процесу за більш дієвими критеріями ефективності [7]. Природні та соціальні фактори навколишнього середовища також впливають й на технічні засоби, через які здійснюється комунікаційне з'єднання. Таких з'єднань багато, тому вони суттєво впливають на якість роботи маршрутів передачі даних за допомогою мереж.

Адаптивне реагування на ситуації з фактичним тимчасовим погіршенням часткових функцій певних елементів обумовлює також знання еталону для даної автоматизованої системи, яка відчула конкретний вплив.

Функціональна стійкість судна на конкретному прогнозованому часовому інтервалі реалізації ОП забезпечується за рахунок підключення додаткових інших інформаційних автоматизованих систем. Співвиконавці необхідні для досягнення цільового наступного кроку. Прийняття ефективних рішень базується на знаннях оцінок відстаней, як дистанцій між окремими поточними значеннями та обраним еталоном [1].

Кожна потенційна інформаційна автоматизована система, яка ефективна у межах ОП, має мати позитивну розрахункову оцінку ступеня стійкості власних функціональних дій. У випадках негативної оцінки наявна ситуація підвищеної чутливості до особливостей приводить до втрати працездатності конкретного програмно-апаратного комплексу [1, 3, 5, 12, 22].

Ступень стійкості характеризує проектний розрахунок функціональної стійкості конкретного етапу у порівнянні з кроками реалізації ОП. При експлуатації, особливо за умов маневрування, деякі фрагменти цього етапу можуть бути відкориговані за рахунок визначення нових умов руху.

Запропонований підхід дозволяє інтегрувати процедури адаптації, навчання та розподілу функцій між людиною та рухомим об'єктом, що швидко рухається та маневрує.

Необхідні технічні засоби програмно-апаратного комплексу реалізуються шляхом автоматизації запропонованих технологічних процесів. Системи прийняття ключових рішень на просторі можливих загрозливих ситуацій СДС в автоматичному режимі точно оцінюють умови управління у реальному часі.

5. 4. Типовий план структурного аналізу в експлуатаційних умовах

Розглянемо типовий приклад структурного аналізу в експлуатаційних умовах [25]. На акваторії реалізації програмного завдання стосовно запланованого рейсу під час руху судна по системі розподілу руху, запровадженій відповідно до Резолюції ІМО А.572 (14) від 20.11.1985 [17, 18, 23], розв'язується маневр. В системах розподілу руху суден, що встановлені Міжнародною морською організацією у районах інтенсивного судноплавства, обов'язково вимагається підвищення якості безпеки управління рухом. Динаміка відновлення функціонального стану реалізується засобами управління рухом суден. Судно як рухомий об'єкт моделюємо згідно диференціального рівняння третього порядку

$$P^3x + c_2P^2x - c_1Px = c_2f(t),$$

де $c_2=a_2/a_3$; $c_1=a_1/a_3$; $c_z=h/a_3$; $a_3=const$ – відомі коефіцієнти при відповідних змінних параметрах диференціального рівняння; $P=d/dt$ – оператор диференціювання у даному випадку першого порядку; $f(t)$ – зовнішнє збурення, що відображає на інтервалі дослідження $0 \leq t \leq T$ відповідну часову функцію зміни впливу даного фактора зовнішнього середовища (наприклад, сил опору течії, хвильового поля, аеродинамічного напору тощо).

Відповідно вищезазначених правил побудови структурної матриці конкретної моделі згідно рівняння (18) отримаємо наступну (рис. 4) структурну матрицю, де $1/P$ – це оператор інтегрування. В даному випадку існують два "дефектних" (не забезпечуючих стійкість) контури.

Контур по першій похідній Px робить замикання завдяки позитивного $C_1 > 0$ коефіцієнта. Другий контур по нульовій похідній змінної x розімкнений, тобто незамкнений. Таким чином об'єкт у даному випадку не має стійкості ні за основною координатою x , ні за швидкістю Px її зміни.

P^3x	P^2x	Px	x	f
$1/P$	$-C_2$	C_1		C
1	$1/P$			
	1	$1/P$		
		1	1	

Рис. 4. Ядро структурної матриці об'єкта дослідження з двома елементами нестійкості згідно диференціальної моделі (18) третього порядку

Відновлення фундаментальної властивості об'єкта зберігати стійкість функціонування в умовах явного впливу факторів $f(t)$ зовнішнього середовища досягається шляхом доповнення об'єкту відповідним регулятором з реалізацією сумісних спільних функцій згідно наступних рівнянь

$$P^3x + C_2P^2x - C_1Px = C_2f(t) - b \cdot U(t),$$

$$U(t) = K_1Px + R_0x,$$

(19)

де b – коефіцієнт інтерфейсної взаємодії об'єкта та регулятора;

U	CBO	P^3x	P^2x	Px	x	K_{33}	f
Σ				K_1	K_0	$-I$	
$-I$	b						
	$-I$	$1/P$	$-C_2$	C_1			C_Σ
		$-I$	$1/P$				
			$-I$	$1/P$			
				I	I		
				$-I$	I		Σ

Рис. 5. Розширена структурна матриця (19) до ядра (18) завдяки посту прийняття рішень з засобами автоматичного регулювання, силовим виконавчим органом (CBO) судна та каналом зворотного зв'язку, якій замикає контур гарантування стійкості

$U(t)$ – закон управління, згідно якого координата на виході регулятора відповідає значенню сигналу на вході силового виконавчого органу, що забезпечує протидію (з протилежним знаком але достатню за потужністю) фактору $C_2 f(t)$ зовнішнього середовища. Структурна матриця моделі (19) зображена на рис. 5 з відображенням нових компонент, що гарантують відновлення стійкості при дії $f(t)$ експлуатаційних збурень.

Таким чином стійкість реалізації експлуатаційного руху судна забезпечують засоби автоматичного регулювання, які виконують необхідні умови структурної стійкості згідно рівнянь (19) для компенсації впливу $f(t)$ збурення [25]. Параметричні достатні умови аналітичного конструювання потрібного регулятора у даному випадку забезпечує нерівність:

$$C_2(v_{K_1} - c_1) > v_{K_0}. \quad (20)$$

У всіх випадках багатомірної СДС, вищенаведені принципи структурно-параметричних перетворень гарантують стійкість експлуатаційних режимів. Але при необхідності проведення більш детального дослідження якості траєкторного управління слід реалізувати за цією процедурою. Кількість перетворень залежить від кожної діагональної матриці, на яку впливають конкретні складові n -мірного збурення.

6. Обговорення результатів метода алгебраїчного-символьного визначення оперативних умов безпечного руху судна у нестационарному середовищі

Отримані результати моделювання декількох ситуативних маневрених режимів підтверджують ефективність знаходження символічних умов існування трансверсальних (безпечних) траєкторій маневрених рухів судна. Саме це дозволяє безаварійно виконувати транспортну роботу за технічними, технологічними, економічними, екологічними та соціальними показниками ефективності. Ситуативні прояви несприятливих умов плавання в нестационарних ризикованих умовах однозначно кваліфіковані.

Але не розглянуто режими динамічного збігу обставин багатьох загроз одночасно. Загрози надзвичайного чи глобального характеру, коли вони раптово наблизились до корпусу судна на цей час не дозволяють здійснити своєчасне безпечне реагування.

В системах розподілу руху суден, що встановлені Міжнародною морською організацією у районах інтенсивного судноплавства, обов'язково вимагається підвищення якості безпеки управління рухом.

Запропонований алгебраїчно-символьний метод дозволяє зняти існуючу ситуативну невизначеність при динамічному розвитку загрозливих впливів факторів ЗНОС під час небажаного збігу неконтрольованих обставин. Це дозволяє знаходити локальні зони для безпечного судноводіння. Таким чином, гарантують життя людей та зберігання вантажів, що знаходяться на борту судна. Запропоновані методи можуть запроваджуватися в інформаційно-управляючих системах на водному транспорті та системах навігації та управління рухом морських та річкових суден різного призначення.

Перспективні напрями удосконалення, що не висвітлені у роботі, можливо реалізувати засобами інформаційних технологій шляхом розширення кількості складових елементів означених множин алгебраїчної системи.

Отримані результати досліджень перспективні для впровадження у сучасних системах експлуатації автоматизованих суден та системах тренажерної підготовки операторів-судноводіїв.

7. Висновки

1. Розроблено метод формалізованого предикативного визначення зон безпечної та небезпечної областей навігації безпосередньо під час рейсу. Метод визначає компенсацію загроз у вигляді динамічного поточного впливу факторів навколишнього нестационарного середовища, яке покриває запланований маршрут руху судна.

2. Визначені у формі алгебраїчно-символьних правил умови гарантування безпеки життя на керовану траєкторію руху судна від початку маневру до його завершення вже на плановий залишок маршруту у заданому просторово-часовому континуумі. Безпека та ефективність траєкторії прогнозовано за рахунок ресурсів, які необхідні та достатні за критеріями <<обчислювальна стабільність – безперервність>>. Логіка цих умов забезпечує постійне безперервне

оперативне керування для запобігання аварій та катастроф, що динамічно наближуються.

3. Запропоновані способи динамічної *real-time* регуляризації техніко-технологічних рішень для безпечного руху судна по трансверсальним траєкторіям. Алгоритми гарантують вхід в усі локальні лише безпечні області навігації. Обчислювальна ефективність комп'ютерної реалізації дозволяє застосовувати додаткові модулі алгебраїзації правил та рішень для широкого спектру типів суден за призначенням, районом плавання та тоннажем. Обмеження на врахування значно удалених зчислених особливостей в неоднорідному, нестационарному та розподіленому підводному, водному та надводному середовищах відсутні.

Література

1. Aisjah A. S. An Analysis Nomoto Gain and Norbin Parameter on Ship Turning Maneuver // IPTEK The Journal for Technology and Science. 2010. Vol. 21, Issue 2. doi: 10.12962/j20882033.v21i2.31
2. Unmanned surface and underwater vehicles / Bremer R. H., Cleophas P. L. H., Fitski H. J., Keus D. // TNO report. TNO-DV 2006 A455. Netherlands, 2007. 126 p.
3. Cândido J. J., Justino P. A. P. S. Modelling, control and Pontryagin Maximum Principle for a two-body wave energy device // Renewable Energy. 2011. Vol. 36, Issue 5. P. 1545–1557. doi: 10.1016/j.renene.2010.11.013
4. Roberts G. N. Trends in marine control systems // Annual Reviews in Control. 2008. Vol. 32, Issue 2. P. 263–269. doi: 10.1016/j.arcontrol.2008.08.002
5. Баранов Г. Л., Тихонов І. В. Ефективність інтелектуалізації інтегрованих систем навігації і управління рухомими транспортними засобами // Системи управління, навігації та зв'язку. 2010. Вип. 1. С. 13–20.
6. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons, 2011. 582 p. doi: 10.1002/9781119994138
7. Guidelines for Voyage Planning // International Maritime Organization. URL: [http://www.ppa.gc.ca/text/publications/IMO%20Resolution%20A.893\(21\)%20-%20Guidelines%20for%20Voyage%20Planning.pdf](http://www.ppa.gc.ca/text/publications/IMO%20Resolution%20A.893(21)%20-%20Guidelines%20for%20Voyage%20Planning.pdf)
8. Гудков Д. Н., Тихонов І. В. Постановка завдання щодо руху об'єктів в неоднорідному середовищі і шляхи його вирішення при експлуатації засобів водного транспорту // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2016. № 1 (46). С. 112–115.
9. Computational ship hydrodynamics: nowadays and way forward / Stern F., Yang J., Wang Z., Sadat-Hosseini H., Mousaviraad M., Bhushan S., Xing T. // International Shipbuilding Progress. 2013. Vol. 60. P. 3–105.
10. Ohsawa T. Contact geometry of the Pontryagin maximum principle // Automatica. 2015. Vol. 55. P. 1–5. doi: 10.1016/j.automatica.2015.02.015
11. Onori S., Tribioli L. Adaptive Pontryagin's Minimum Principle supervisory controller design for the plug-in hybrid GM Chevrolet Volt // Applied Energy. 2015. Vol. 147. P. 224–234. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.021

12. Ozatay E., Ozguner U., Filev D. Velocity profile optimization of on road vehicles: Pontryagin's Maximum Principle based approach // *Control Engineering Practice*. 2017. Vol. 61. P. 244–254. doi: 10.1016/j.conengprac.2016.09.006
13. Saerens B., Van den Bulck E. Calculation of the minimum-fuel driving control based on Pontryagin's maximum principle // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2013. Vol. 24. P. 89–97. doi: 10.1016/j.trd.2013.05.004
14. Баранов Г. Л., Міронова В. Л., Тихонов І. В. Аксиоматика алгоритмічних перетворень в інтелектуальних системах навігації та управління рухом суден // *Автоматизация судовых технических средств*. 2012. Вып. 18. С. 3–12.
15. Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972 (COLREG). International Maritime Organization. London: IMO, 2004. 45 p.
16. Costa Concordia owner faces \$2 billion in costs. Disaster at Sea. URL: <http://disasteratsea.com/index.php/costa-concordia-owner-faces-2-billion-in-costs/>
17. General provisions on ships' routing. URL: https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_1369_14/5/
18. New Ships' Routing. 2015 edition (adopted on 95th session of the IMO Maritime Safety Committee June 2015). London: International Maritime Organization, 2015. 68 p.
19. Safety and Shipping Review 2015. Allianz Global Corporate & Specialty. URL: <https://www.cesam.org/documents/Shipping-Review-2015.pdf>
20. Casualty Statistic. Global Integrated Shipping Information of International Maritime Organization. URL: <https://gis.imo.org/Public/MCI/Default.aspx>
21. Chu Z., Zhu D., Eu Jan G. Observer-based adaptive neural network control for a class of remotely operated vehicles // *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 127. P. 82–89. doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.09.038
22. Тихонов І. В. Судовождение без столкновений и катастроф при эксплуатации на акваториях с рисками // *Научные труды Азербайджанской Государственной Морской Академии*. 2016. № 2. С. 61–68.
23. SOLAS. International Maritime Organization, 2009.
24. Carriage Requirements for Shipborne Navigational Systems and Equipment. Resolution MSC.282 (86) adopted on 5 June 2009. URL: [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MSC.282\(86\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.282(86).pdf)
25. Баранов Г. Л., Тихонов І. В., Соболевський Г. Г. Структурний аналіз складних динамічних систем траєкторного управління та безпеки руху об'єктів водного транспорту // *Водний транспорт*. 2014. Вип. 1. С. 71–79.
26. Scherer R. Relational Modular Fuzzy Systems // *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. 2012. P. 39–50. doi: 10.1007/978-3-642-30604-4_4
27. IEC 31010:2009. Risk Management – Risk Assessment Techniques. International Organization for Standardization, 2009. 176 p.
28. Yang M.-S., Lin T.-S. Fuzzy least-squares linear regression analysis for fuzzy input–output data // *Fuzzy Sets and Systems*. 2002. Vol. 126, Issue 3. P. 389–399. doi: 10.1016/s0165-0114(01)00066-5

29. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8, Issue 3. P. 338–353. doi: 10.1016/s0019-9958(65)90241-x
30. Anderson T. The Statistical Analysis of Time Series. Wiley-Interscience, 1994. 704 p.
31. Тихонов І. В. Оцінювання ефективності етапів операційного плану під час руху суден в районах з обмеженими габаритами // Системи управління, навігації та зв'язку. 2011. Вип. 3 (19). С. 19–21.
32. Rusu R. B., Cousins S. 3D is here: Point Cloud Library (PCL) // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011. doi: 10.1109/icra.2011.5980567

Не являється переизданием