

МІНІМІЗАЦІЯ ЕКОНОМІЧНИХ ВТРАТ ПОВ'ЯЗАННИХ З ПРОЦЕСОМ РОЗХОДЖЕННЯ СУДНА МАНЕВРОМ ЗМІНОЮ КУРСУ

Олександр Вікторович Гайченя

Кафедра "Морські перевезення",
Національний Університет "Одеська морська академія", Одеса, Україна
ORCID 0000-0002-7899-4418

Михайло Степанович Алексейчук

Кафедра "Електронні комплекси судноводіння",
Національний Університет "Одеська морська академія", Одеса, Україна

Анотація: у роботі розглянуто стандартний маневр розходження судна зміною курсу в ситуації небезпечного зближення, який характеризується параметрами відхилення від програмної траєкторії руху і повернення на неї після розходження. Запропонована процедура оптимізації параметрів безпечного маневру розходження, яка мінімізує економічні втрати на його виконання.

Ключові слова: безпека судноводіння, небезпечне зближення, маневр розходження зміною курсу, процедура оптимізації параметрів маневру розходження, втрати пройденої відстані.

1. Вступ

За останні 40 років обсяги перевезень морем зросли майже в чотири рази, причому багатотоннажні судна складають приблизно 80% від світового тоннажу. За цей же час світовий флот втратив 1,4% суден від його загальної кількості. Значну частину (7%) втрачено судна по причині їх зіткнень.

Якраз морські багатотоннажні судна близько 20% експлуатаційного часу проводять в прибережних стислих водах, які характеризуються інтенсивним судноплавством та навігаційними перешкодами, що значно ускладнює плавання морських суден в стислих водах і створює передумови для виникнення аварійних ситуацій. Слід зазначити, що в прибережних стислих водах виникає три четверті посадок на мілину і зіткнень суден.

Тому попередження зіткнень суден при плаванні в стислих районах є однією із найбільш актуальних проблем забезпечення безаварійності судноводіння.

При плаванні в стислих водах виникає необхідність в частому маневруванні через небезпечні зближення суден, чим викликана потреба в розробці способів коректного і безпечного маневрування при розходженні.

В разі небезпечного зближення, коли дистанція найкоротшого зближення менша від критичної можливої дистанції зближення, судно виконує маневр розходження зміною курсу або/і швидкості для попередження зіткнення. При наявності достатнього безпечного простору рекомендується маневр розходження зміною курсу, який застосовується найчастіше.

Причому при розходженні зміною курсу частина програмної траєкторії замінюється траєкторією розходження, що веде до додаткової витрати палива.

Кількість палива, яка витрачається на маневр розходження ΔP_t , в першому наближенні визначається наступним виразом:

$$\Delta P_t = D_p \Delta L p_t,$$

де p_t - питома витрата палива на одну тонно-мілю при середній заданій швидкості судна на переході;

D_p - водотоннажність судна;

ΔL - втрати пройденої відстані, що виникають через маневр розходження.

Аналіз приведенного виразу показує, що значення ΔP_t залежить лише від ΔL , тому що під час маневру розходження зміною курсу з незмінною швидкістю величини p_t і D_p являються постійними.

2. Мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження - процес розходження суден в ситуації небезпечного зближення.

Предмет дослідження - економічна ефективність маневру розходження зміною курсу.

Мета дослідження - розробка процедури оптимізації безпечного маневру розходження зміною курсу, яка мінімізує витрати палива на процес розходження.

Задачі дослідження:

1. формалізувати маневр розходження зміною курсу при наявності одної або двох частин програмної траєкторії руху в районі небезпечного зближення суден;
2. визначити залежність втрати пройденої відстані, що виникають через маневр розходження, від його параметрів;
3. розробити процедуру оптимізації маневру розходження зміною курсу по критерію витрат палива на процес розходження.

3. Аналіз джерел

Сучасні дослідження по проблематиці безпечного розходження суден відображені в численних роботах вітчизняних і закордонних вчених.

Так, основні засади управління процесом розходження суден у ситуації небезпечного зближення розглянуті у роботі [1], а робота [2] присвячена дослідженню методів локально-незалежного управління та у ній запропоновано метод формування гнучких стратегій розходження, які враховують основні чинники.

В роботі [3] розглянуто формалізацію взаємодії суден при небезпечному зближенні і у залежності від його типу рекомендується вибір стратегії розходження для попередження зіткнення. Екстрену стратегію розходження при надмірному зближенні суден запропоновано у роботі [4], а аналіз керованості ситуацією під час небезпечного суден досліджено у роботі [5].

Урахування навігаційних перешкод та інерційності судна при розрахунку параметрів маневру розходження розглянуто на роботах [6, 7]. В роботі [8] запропоновано визначити межу між ситуаціями зближення суден, що йдуть прямо один на одного, перетинання курсів та обирати дію в ситуації перетинання курсів тільки залежно від різниці між курсами суден без використання носового сектора курсових кутів.

Особливості розходження суден у морі шляхом попередження їх зіткнення зміщенням на лінію паралельну шляху розглянуті в монографії [9]. В роботі [10] розглянуто модель, яка поєднує концепцію домену із просторовим картуванням ризику у регіональному масштабі. Перевагою моделі являється можливість візуалізації просторового розподілу небезпеки, а недоліком є відсутність оцінки точності моделі та її сучасної актуальності.

Метод визначення багатокутного домену, який поєднує аналітичний і статистичний підходи з урахуванням досвіду судноводіїв запропоновано у статті [11]. Основною перевагою даного методу є використання людського фактору, а недоліком — недостатня кількість експериментальних перевірок у різних типах акваторій, а в дослідженні [12] розглянуто модель оцінювання ризику зіткнення на основі домену, що придатна для систем попередження зіткнення суден «near-miss», недоліком якої є відсутність адаптації до стислих вод і вона пристосована переважно для відкритих акваторій.

У роботі [13] представлено домени для обмежених водних шляхів, для формування яких враховуються тип судна, його швидкість і ширина каналу, що має значення для аналізу пропускної здатності каналів. Недоліком роботи являється відсутність загальних параметрів доменів, що обмежує їх загальне застосування.

Інтелектуальний алгоритм попередження зіткнень на основі глибоких Q-мереж (DDQN) з урахуванням правил COLREGs розглянуто у статті [14], який являється перспективним для автономних суден, але не забезпечує пояснення прийнятих рішень, а в роботі [15] представлено параметр домену, що враховує маневрові характеристики та тип ситуації зближення. Перевагою даного методу є врахування динаміки судна, а недоліком — відсутність практичних прикладів.

4. Дослідження

В даному розділі розглянемо залежність втрати пройденої відстані від параметрів маневру розходження та процедуру оптимізації маневру розходження зміною курсу по критерію витрат палива на процес розходження.

Розглянемо втрати пройденої відстані ΔL , коли судно до виконання маневру розходження зміною курсу в момент часу t_y починає відхилитися курсом K_y від програмної траєкторії руху і потім в момент часу t_b повертається до неї курсом K_b після безпечного розходження. Розглянемо алгоритм вибору оптимального маневру розходження з множини допустимих маневрів U , у якому досягається мінімальне значення критерію оптимальності ΔL , що виникають внаслідок розходження. Враховуючи, що маневр розходження завершується виходом судна на програмну траєкторію руху, можна обчислити фактичну довжину частини програмної траєкторії L_m , яку пройшло судно протягом маневру розходження, і відстань L , яке судно пройшло б по програмній траєкторії без маневрування. Різниця $\Delta L = L_m - L$ є втратою пройденої відстані, і її приймаємо як критерій оптимальності, що характеризує економічність маневру.

Знайдемо залежність величини ΔL від параметрів маневру розходження t_y , K_y , t_b та K_b . Для цього звернемося до рис. 1, на якому наведено ілюстрацію ситуації розходження при наявності програмного повороту, тобто коли програмна траєкторія містить дві ділянки з курсами K_{o1} та K_{o2} . Очевидно, що:

$$L_m = V_o(\Delta t_b + \Delta t_k) \text{ і } L = L_a + dL,$$

$$\text{де } \Delta t_b = t_b - t_y, \quad \Delta t_k = t_k - t_b \quad \text{і} \quad dL = \sqrt{(X_k - X_m)^2 + (Y_k - Y_m)^2}.$$

Тоді отримаємо:

$$\Delta L = V_o(\Delta t_b + \Delta t_k) - L_a - \sqrt{(X_k - X_m)^2 + (Y_k - Y_m)^2}.$$

Знайдемо вираз для координат X_k , Y_k і моменту часу t_k . Для цього запишемо рівняння другої ділянки програмної траєкторії як прямої, що проходить через крапку з координатами X_m і Y_m :

$$(Y - Y_m) \sin K_{o2} = (X - X_m) \cos K_{o2}.$$

З іншого боку, поточні значення координат судна на ділянці виходу на програмну траєкторію мають вигляд:

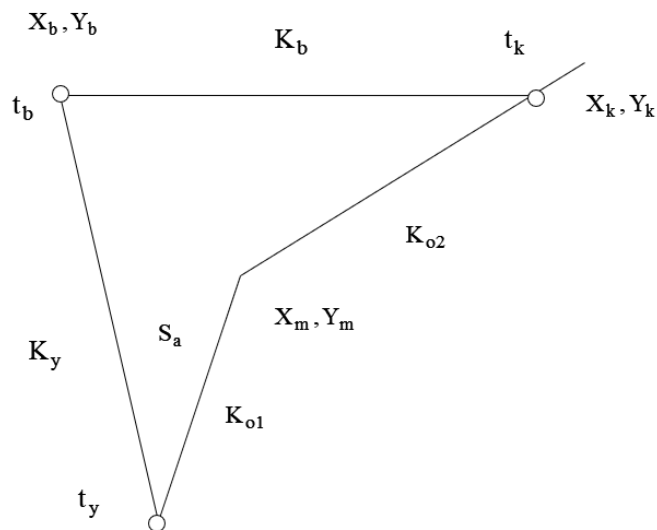


Рис. 1. До виведення виразу критерію оптимальності ΔL
Власна розробка автора

$$X = X_b + V_o t \sin K_b, \quad Y = Y_b + V_o t \cos K_b.$$

Оскільки точка (X_k, Y_k) одночасно належить обом прямим, то справедлива рівність:

$$(Y_b + V_o \Delta t_k \cos K_b - Y_m) \sin K_{o2} = (X_b + V_o \Delta t_k \sin K_b - X_m) \cos K_{o2},$$

з якого знаходимо вираз для Δt_k :

$$\Delta t_k = \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{V_o \sin(K_{o2} - K_b)}.$$

При відомому значенні Δt_k нескладно знайти вирази для X_k і Y_k , які мають такий вигляд:

$$X_k = X_b + V_o \Delta t_k \sin K_b, \quad Y_k = Y_b + V_o \Delta t_k \cos K_b.$$

Підставляючи вирази для Δt_k , отримаємо:

$$X_k = X_b + \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{\sin(K_{o2} - K_b)} \sin K_b,$$

$$Y_k = Y_b + \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{\sin(K_{o2} - K_b)} \cos K_b.$$

Знаходимо вирази для приросту координат $X_k - X_m$ і $Y_k - Y_m$, використовуючи отримані залежності:

$$X_k - X_m = X_b - X_m + \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{\sin(K_{o2} - K_b)} \sin K_b =$$

$$\frac{(X_b - X_m) \sin(K_{o2} - K_b)}{\sin(K_{o2} - K_b)} + \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{\sin(K_{o2} - K_b)} \sin K_b =$$

$$\frac{\sin K_{o2}[(X_b - X_m) \cos K_b - (Y_b - Y_m) \sin K_b]}{\sin(K_{o2} - K_b)}.$$

Аналогічно знаходимо вираз для $Y_k - Y_m$:

$$Y_k - Y_m = Y_b - Y_m + \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{\sin(K_{o2} - K_b)} \cos K_b =$$

$$\frac{\cos K_{o2}[(X_b - X_m) \cos K_b - (Y_b - Y_m) \sin K_b]}{\sin(K_{o2} - K_b)}.$$

Знайдемо вираз:

$$\sqrt{(X_k - X_m)^2 + (Y_k - Y_m)^2} = \frac{(X_b - X_m) \cos K_b - (Y_b - Y_m) \sin K_b}{\sin(K_{o2} - K_b)}$$

який підставляємо в ΔL та отримуємо:

$$\Delta L = V_o \Delta t_b + \frac{[(X_b - X_m) \cos K_{o2} - (Y_b - Y_m) \sin K_{o2}]}{\sin(K_{o2} - K_b)} - L_a \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{(X_b - X_m) \cos K_b - (Y_b - Y_m) \sin K_b}{\sin(K_{o2} - K_b)}.$$

Очевидно, що значення координат X_b і Y_b визначаються формулами $X_b = V_o \Delta t_b \sin K_y$ і $Y_b = V_o \Delta t_b \cos K_y$, з урахуванням яких останній вираз набуває вигляду:

$$\Delta L = V_o \Delta t_b - L_a + \frac{V_o \Delta t_b [\sin K_y (\cos K_{o2} - \cos K_b) - \cos K_y (\sin K_{o2} - \sin K_b)]}{\sin(K_{o2} - K_b)} + \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{Y_m (\sin K_{o2} - \sin K_b) - X_m (\cos K_{o2} - \cos K_b)}{\sin(K_{o2} - K_b)}.$$

Перший доданок отриманого виразу множимо і ділимо на $\sin(K_{o2} - K_b)$ і після перетворення остаточно знаходимо:

$$\Delta L = \frac{V_o \Delta t_b [\sin(K_{o2} - K_b) + \sin(K_b - K_y) + \sin(K_y - K_{o2})]}{\sin(K_{o2} - K_b)} + \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{Y_m (\sin K_{o2} - \sin K_b) - X_m (\cos K_{o2} - \cos K_b)}{\sin(K_{o2} - K_b)} - L_a.$$

Очевидно, у випадку програмної траєкторії, що має одну ділянку з курсом K_o , величина ΔL визначається наступним виразом:

$$\Delta L = \frac{V_o (t_b - t_y) [\sin(K_o - K_b) + \sin(K_b - K_y) + \sin(K_y - K_o)]}{\sin(K_o - K_b)}, \quad (1)$$

так як $L_a = 0$.

Отримавши залежність критерію оптимальності ΔL від параметрів маневру розходження t_y , K_y , t_b і K_b , необхідно знайти процедуру обчислення їх оптимальних значень, які забезпечують мінімум втрати пройденої відстані ΔL . Для подальшого розгляду припустимо, що існує допустима множина маневрів розходження з відомими граничними значеннями параметрів t_{y*} , t_y^* , K_{y*} , K_y^* , t_{b*} , t_b^* , K_{b*} , K_b^* .

Особливістю розглянутої оптимізаційної задачі є залежність граничних значень K_{y*} , K_y^* , t_{b*} і t_b^* від величин параметрів t_y , K_y і K_b , причому K_{y*} залежить тільки від поточного значення t_y , тоді як t_{b*} залежить від усіх трьох параметрів, t_y , K_y і K_b .

Тому доцільно вчинити так. Необхідно дослідити поведінку критерію оптимальності ΔL за допомогою частинних похідних по параметрам маневру розходження, причому знаходити оптимальне значення одного з параметрів та модифікувати критерій оптимальності, зменшуючи його розмірність на одиницю шляхом виключення оптимального параметра. Доцільно спочатку зробити зазначену процедуру з параметром t_b , оскільки його граничні значення є функцією найбільшого числа параметрів.

Знайдемо частинну похідну $\frac{\partial \Delta L}{\partial t_b}$. Очевидно, що незалежно від числа ділянок програмної траєкторії, справедливим є вираз:

$$\frac{\partial \Delta L}{\partial t_b} = \frac{V_o [\sin(K_o - K_b) + \sin(K_b - K_y) + \sin(K_y - K_o)]}{\sin(K_o - K_b)}.$$

Позначимо $\gamma_b = K_o - K_b$ і $\gamma_y = K_y - K_o$. Тоді вираз для похідної набуває наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta L}{\partial t_b} &= \frac{V_o [\sin(K_o - K_b) + \sin(K_b - K_y) - \sin(K_y - K_o)]}{\sin(K_o - K_b)}. \\ \frac{\partial \Delta L}{\partial t_b} &= V_o \left[1 + \frac{\sin(K_b - K_y) + \sin(K_y - K_o)}{\sin(K_o - K_b)} \right], \text{ або} \\ \frac{\partial \Delta L}{\partial t_b} &= V_o \left[1 + \frac{-\sin(\gamma_b + \gamma_y) + \sin \gamma_y}{\sin \gamma_b} \right] = \\ &= V_o \left[1 + \frac{\sin \gamma_y - \sin \gamma_y \cos \gamma_b - \cos \gamma_y \sin \gamma_b}{\sin \gamma_b} \right] = \\ &= V_o \left[1 + \frac{\sin \gamma_y (1 - \cos \gamma_b) - \cos \gamma_y \sin \gamma_b}{\sin \gamma_b} \right] = V_o \left[1 + \sin \gamma_y \frac{(1 - \cos \gamma_b)}{\sin \gamma_b} - \cos \gamma_y \right]. \end{aligned}$$

Враховуємо, що $\sin \gamma_b = 2 \sin \frac{\gamma_b}{2} \cos \frac{\gamma_b}{2}$ і $1 - \cos \gamma_b = 2 \sin^2 \frac{\gamma_b}{2}$, тому:

$$\frac{\partial \Delta L}{\partial t_b} = V_o \left[1 + \sin \gamma_y \operatorname{tg} \frac{\gamma_b}{2} - \cos \gamma_y \right].$$

Звертаємо увагу на ту обставину, що добуток $\sin \gamma_y \operatorname{tg} \frac{\gamma_b}{2} \geq 0$ для всіх допустимих значень $\gamma_y \leq \pi$ і $\gamma_b \leq \pi$, і також $1 - \cos \gamma_y \geq 0$. Отже, $\frac{\partial \Delta L}{\partial t_b} \geq 0$ незалежно від значень параметрів маневру розходження. Це означає, що мінімум ΔL досягається при $t_b = t_{b*}$.

Тому, підставляючи вираз (1) для ΔL , аналітичну залежність, якою виражається t_{b*} , зробимо модифікацію критерію оптимальності ΔL , виключаючи змінну t_b , і тим самим знижуючи його розмірність на одиницю, тобто $\Delta L_1 = \Delta L(t_{b*})$, причому $\Delta L_1 = f(t_y, K_y, K_b)$.

Враховуємо, що [1]:

$$t_{b*} = t_y + \frac{\Delta_b D_d + D_n \sin(\alpha_n - K_{otb}) + V_{otn} t_y \sin(K_{otb} - K_{otn})}{V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb})},$$

де Δ_b - показник відхилення, причому $\Delta_b = 1$, при відхиленні судна вправо і $\Delta_b = -1$, при відхиленні вліво;

α_n і D_n - відповідно початкові пеленг і дистанція до небезпечного судна;

D_d - критична можлива дистанція зближення;

K_{otn} , K_{oty} і K_{otb} - відповідно відносні курси початковий, відхилення та виходу на програмну траєкторію;

V_{otn} і V_{oty} - відповідно відносні швидкості початкової та відхилення.

Тому для стандартного маневру розходження у разі однієї ділянки програмної траєкторії отримаємо:

$$\Delta L_1 = \frac{V_o(t_{b*} - t_y)[\sin(K_o - K_b) + \sin(K_b - K_y) + \sin(K_y - K_o)]}{\sin(K_o - K_b)}, \quad (2)$$

або після підстановки виразу для t_{b*} :

$$\Delta L_1 = G_1 \frac{V_o[\sin(K_o - K_b) + \sin(K_b - K_y) + \sin(K_y - K_o)]}{\sin(K_o - K_b)},$$

$$\text{де } G_1 = \frac{\Delta_b D_d + D_n \sin(\alpha_n - K_{otb}) + V_{otn} t_y \sin(K_{otb} - K_{otn})}{V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb})}.$$

Значення курсу виходу K_b є фіксованою величиною і визначається лише програмним курсом K_o , тобто $K_b = K_o - 30\delta$, де $\delta = 1$, при істинному ухиленні судна вправо і $\delta = -1$ - при ухиленні вліво. Тому модифікований критерій оптимальності ΔL_1 залежить тільки від часу t_y та курсу відхилення K_y , тобто $\Delta L_1 = f(t_y, K_y)$.

Аналіз частинної похідної критерію оптимальності ΔL_1 за параметром K_y показав, що знак похідної $\frac{\partial \Delta L_1}{\partial K_y}$ збігається зі знаком виразу $\sin(K_o - K_b)$, який, у свою чергу, визначається знаком характеристики істинного ухилення судна δ . Тому знак частинної похідної співпадає

зі знаком δ . Це означає, що мінімум критеріїв оптимальності ΔL_1 і ΔL досягається на нижній межі курсу ухилення K_{y*} .

Цей висновок підтверджується рис. 2, з якого випливає, що довжина траєкторії маневру

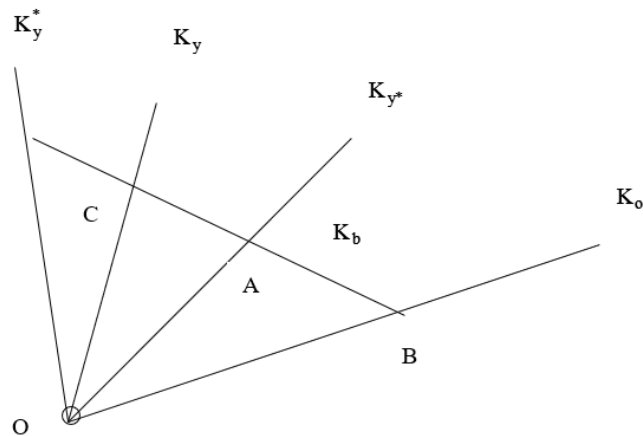


Рис. 2. Мінімальна траєкторія
Власна розробка автора

розходження OAB з курсом ухилення K_{y*} є мінімальною порівняно з іншими траєкторіями, наприклад, траєкторії ОСВ з курсом ухилення K_y . Вибір оптимального значення часу ухилення t_y визначається наступною обставиною. Очевидно, що нижня межа курсу ухилення K_{y*} є функцією часу ухилення, що зростає, як показано на рис. 3.

Отже, найменше значення K_{y*} досягається на нижній межі часу ухилення t_{y*} , що забезпечує мінімальне значення ΔL по всіх параметрах маневру розходження.

Таким чином, оптимальними параметрами маневру розходження є нижня межа часу ухилення t_{y*} заданого курсу виходу K_b , за якими обчислюються нижні межі курсу ухилення K_{y*} та часу виходу t_{b*} .

5. Результати та обговорення

Результати проведеного дослідження показали, що економічна ефективність безпечного стандартного маневру розходження зміною курсу визначається затратами палива на його

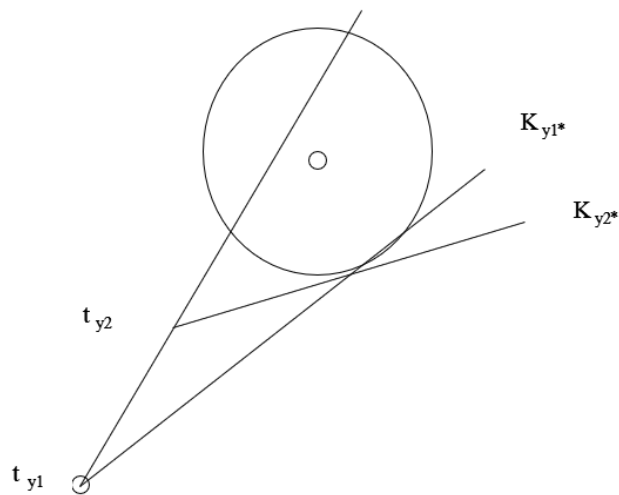


Рис. 3. Залежність K_{y*} від t_y

Власна розробка автора

проведення, які залежать від втрати пройденної відстані. Тому для пошуку значень його параметрів, які забезпечують мінімальні затрати палива і безпечне розходження, доцільно в якості критерію оптимальності вибрати втрати пройденної відстані ΔL .

Подальший аналіз показав, що втрати пройденної відстані залежать від моменту часу початку відхилення, курсу відхилення від програмної траєкторії руху, моменту часу повернення до неї та курсу повернення після безпечного розходження. Критерій оптимальності потрібно мінімізувати за декількома параметрами маневру розходження, тому було застосовано спосіб покрокової оптимізації по кожному із параметрів, модифікуючи критерій оптимальності на кожному кроці і виключаючи із нього оптимальний параметр. В результаті запропонованого способу виявилось, що мінімальне значення втрати пройденної відстані набувають на нижніх межах допустимих значень параметрів маневру розходження.

Наукова новизна отриманих результатів. Елементами наукової новизни виконаної роботи являються:

1. Аналітична залежність втрати пройденної відстані ΔL через стандартний маневр розходження зміною курсу від його параметрів.
2. Процедура пошуку оптимальних параметрів маневру розходження зміною курсу покроковим виключенням розглянутих параметрів з аналітичного виразу критерію оптимальності.
3. Стратегія оптимізації стандартного маневру розходження зміною курсу, яка мінімізує втрати пройденної відстані, а отже і палива, на його проведення.

В подальшому доцільно дослідити урахування наявності навігаційних перешкод при виборі маневру розходження з використанням електронних карт.

6. Висновки

1. Проведена формалізація маневру розходження зміною курсу, коли в районі небезпечного зближення суден наявна одна або дві частини програмної траєкторії руху судна, що маневрує.
2. Одержана залежність втрати пройденної відстані і затрат палива на процес розходження, що виникають через маневр розходження, від параметрів маневру;
3. Запропоновано процедуру оптимізації маневру розходження зміною курсу, яка мінімізує витрати палива на процес розходження.

Список літератури:

- 1) Burmaka, I. A., Piatakov, E. N., & Bulgakov, A. Iu. (2016). Upravlenie sudnomy v sytuatsyy opasnoho sblyzheniya [Ship control in a situation of dangerous approach]. LAP LAMBERT Academic Publishing.
- 2) Tsymbal, N. N., Burmaka, I. A., & Tiushkov, E. E. (2007). Gibkie strategii raskhozhdeniia sudov [Flexible ship collision avoidance strategies]. KP ОНТ.
- 3) Piatakov, E. N., Buzhbettskyi, R. Iu., Burmaka, I. A., & Bulgakov, A. Iu. (2015). Vzaimodeistvie sudov pri raskhozhdenii dlia preduprezhdeniia stolknoveniia [Interaction of ships during avoidance to prevent collision]. Hryn D.S.
- 4) Burmaka, I. A., Burmaka, A. I., & Buzhbettskyi, R. Iu. (2014). Ekstreennaia strategii raskhozhdeniia pri chrezmernom sblizhenii sudov [Emergency avoidance strategy in case of excessive approach of ships]. LAP LAMBERT Academic Publishing.
- 5) Бурмака І.О., Алексейчук М.С., Бурмака О. І. Керуваність ситуацією під час небезпечного суден // Shipping & Navigation. - 2024.- Вип. 36. - С. 30-38. DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.30-38.
- 6) Burmaka, I. A. (2005). Rezultaty imitatsionnoho modelyrovaniia protsessa raskhozhdeniia sudov s uchetom ikh dinamiki [Results of simulation modeling of the ship avoidance process taking into account their dynamics]. *Sudovozhdenie [Navigation]*, (10), 21–25.
- 7) Petrychenko, E. A. (2003). Vyvod usloviia sushchestvovaniia mnozhestva dopustimyykh manevrov raskhozhdeniia s uchetom navigatsionnykh opasnostei [Derivation of the condition for the existence of a set of permissible avoidance maneuvers taking into account navigational hazards]. *Sudovozhdenie [Navigation]*, (6), 103–107.
- 8) Вагушенко Л.Л., Козаченко О.Ю. Аналіз зближень двох суден з ризиком зіткнення // Shipping & Navigation. - 2024.- Вип. 36. - С. 39-56. DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.39-56.
- 9) Vahushchenko, L. L. (2013). Raskhozhdenie s sudnomy smeshcheniem na parallelnuiu liniyu puti [Avoidance with ships by shifting to a parallel track line]. Feniks.
- 10) Liu Z, Wu Z., Zheng Z., Yu X., Bu X., Zhang, W. (2023). A Domain-Based Model for Identifying Regional Collision Risk and Depicting Its Geographical Distribution. *J. Mar. Sci. Eng.* pp.11, <https://doi.org/10.3390/jmse11112092>.
- 11) Dinh G. H., Im N. K.(2016). The combination of analytical and statistical method to define polygonal ship domain and reflect human experiences in estimating dangerous area. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, vol. 4, 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.009>
- 12) Szlapczynski R, Szlapczynska J. (2021). A ship domain-based model of collision risk for near-miss detection and Collision Alert Systems. *Reliability Engineering & System Safety*. vol. 214. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107766>.
- 13) Liu J., Feng Z., Li Z., Wang M., Wen L. R. (2016). Dynamic Ship Domain Models for Capacity Analysis of Restricted Water Channels. *Journal of Navigation*, vol. 69,. 481-503. <https://doi.org/10.1017/S0373463315000764>.
- 14) Zhai P., Zhang Y., Shaobo W. (2022). Intelligent Ship Collision Avoidance Algorithm Based on DDQN with Prioritized Experience Replay under COLREGs. *J. Mar. Sci. Eng.* 10, 585. 1- 29. <https://doi.org/10.3390/jmse10050585>.
- 15) Tianyu Yang, Xin Wang and Zhengjiang Liu. (2023). A Novel Ship Domain-oriented Parameter of Ship Collision Risk Considering the Ship Maneuverability and Encounter Situation. *Journal of Marine Science and Application*. 22. 181-198. <https://doi.org/10.1007/s11804-023-00330-0>.