

Дубинець О.І., Маранов О.В.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН МЕТОДОМ ДИНАМІЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ СТОХАСТИЧНИХ ФАКТОРІВ НАВІГАЦІЙНОЇ ОБСТАНОВКИ

У статті запропоновано новий підхід до оптимізації процесу запобігання зіткнення суден із застосуванням методу динамічного програмування, який враховує стохастичний характер навігаційної ситуації. Розроблено математичну модель процесу дивергенції, яка включає випадкові фактори середовища. Запропоновано алгоритм прийняття рішень на основі принципу оптимальності Беллмана. Запропоновано способи імітаційного моделювання, щоб підтвердити ефективність зазначеного методу для подальших досліджень. Розроблений спосіб потенційно забезпечує підвищення безпеки судноплавства в складних умовах при мінімізації витрат на контроль. Метою роботи є розробка концептуальної моделі для оптимізації розходження суден із використанням методу динамічного програмування та аналіз впливу стохастичних факторів на ефективність цього процесу. Результати цього дослідження демонструють перспективність використання методу динамічного програмування для оптимізації процесу розходження суден в умовах стохастичних факторів навігаційного середовища.

Ключові слова: безпека судноплавства, безпека судноводіння, стиснені води, запобігання зіткнення суден, динамічне програмування, стохастичні фактори, оптимізація, прийняття рішень, морський транспорт.

Вступ. Оптимізація процесу розходження суден є однією з ключових задач сучасної морської навігації, особливо в умовах високої інтенсивності руху в портових акваторіях та вузьких проходах. Зростаючі вимоги до безпеки мореплавства, а також необхідність підвищення енергоефективності та зменшення ризиків навігаційних аварій, потребують впровадження сучасних математичних методів для підтримки рішень.

Метод динамічного програмування, заснований на формулі Беллмана, дозволяє будувати ефективні траєкторії руху суден, враховуючи стохастичні фактори навігаційного середовища. Цей підхід дає можливість адаптивно реагувати на змінні умови, зокрема погодні явища, взаємодію з іншими суднами та технічні особливості конкретного судна.

Метою роботи є розробка концептуальної моделі для оптимізації розходження суден із використанням методу динамічного програмування та аналіз впливу стохастичних факторів на ефективність цього процесу.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить про значний інтерес до методів динамічного програмування в задачах морської навігації [1-3]. Зокрема, дослідження [4] демонструють ефективність методу Беллмана у плануванні безпечних траєкторій суден. Однак більшість досліджень зосереджені на детермінованих моделях, що обмежує їхню практичну застосовність у реальних умовах із високим ступенем невизначеності.

Роботи [5] та [6] акцентують увагу на необхідності врахування стохастичних факторів, таких як вітрові та течієві умови, для точнішого прогнозування навігаційної обстановки. Незважаючи на ці успіхи, залишається невирішеною проблема інтеграції стохастичних підходів із динамічним програмуванням у морській навігації [8-10].

Методологія. Основні етапи моделювання:

1. Формулювання задачі. Розглядається оптимізація траєкторії судна в координатах x , y , t за умови мінімізації функціоналу витрат:

$$J = \int_{t_0}^{t_n} (C(x, y, t) + P(x, y, t)) dt \quad (1)$$

де J — загальний функціонал витрат, який необхідно мінімізувати,

t_0, t_n — початковий і кінцевий моменти часу, відповідно;

$C(x, y, t)$ — функція витрат на рух судна залежно від просторових координат (x, y) і часу (t) . Наприклад, це може бути витрати пального або енергії;

$P(x, y, t)$ — ймовірність виникнення небезпечної ситуації (наприклад, зіткнення або виходу за межі безпечної зони) у заданій точці (x, y) у момент часу t .

2. Формула Беллмана. Для оптимізації використовується рекурентне рівняння Беллмана:

$$V(x, y, t) = \min_u [C(x, y, t) + E[V(x', y', t + 1)]] \quad (2)$$

де $V(x, y, t)$ — мінімальна вартість проходження з поточного стану (x, y, t) до кінцевого стану;

u — керування (наприклад, напрямок чи швидкість руху судна), яке вибирається для мінімізації витрат;

$E[V(x', y', t+1)]$ — математичне очікування значення функції вартості V у наступному стані $(x', y', t+1)$. Це дозволяє враховувати стохастичні фактори.

3. Стохастичні фактори. Модель включає випадкові впливи, такі як зміни швидкості вітру (v_w) та течії (v_c):

$$x' = x + v \times \cos \theta \times \Delta t + \epsilon_x \quad (3)$$

$$y' = y + v \times \sin \theta \times \Delta t + \epsilon_y \quad (4)$$

де x', y' — нові координати судна після переміщення;

x, y — поточні координати судна;

V — швидкість судна;

θ — курс судна (напрямок руху);

Δt — крок часу;

ϵ_x, ϵ_y — стохастичні збурення, які враховують невизначеність, викликану, наприклад, вітром чи течією.

Отже, процес розходження двох суден представляє собою стохастичну динамічну систему, в якій судна мають елементи руху (курс та швидкість) та місцеположення у просторі (координати) у визначений момент часу. Також, на динамічну систему впливають випадкові збурення, що характеризують невизначеність навігаційної обстановки. Для оптимізації процесу розходження двох зазначених суден можна застосувати метод динамічного програмування, що базується на принципі оптимальності Беллмана, враховуючі стохастичні збурення у системі. Таким чином, можна узагальнити наступний алгоритм прийняття рішень:

1. оцінка поточного стану системи;
2. прогноз розвитку ситуації з урахуванням стохастичних факторів;
3. розрахунок оптимального управління методом динамічного програмування;
4. реалізація керуючих впливів.

Результати та рекомендації. Запропоновані моделі можна використати для подальших досліджень, наприклад:

1. Адаптивна модель динамічного програмування. Модель базується на використанні формули Беллмана для побудови оптимальних траєкторій із врахуванням стохастичних факторів. Наприклад, судно має подолати ділянку з інтенсивним рухом на вході до порту при змінних умовах вітру та течії. Застосування формули Беллмана (2) дозволяє побудувати траєкторію, яка мінімізує ймовірність зіткнення, враховуючи ймовірність змін зовнішніх умов. У цьому випадку система може враховувати прогнозовані зміни швидкості течії та сили вітру (3, 4), а також маневри інших суден у зоні;

2. Інтеграція з навігаційними системами (ЕКНІС). Поєднання адаптивної моделі з ЕКНІС дозволить в реальному часі відображати оптимальні траєкторії на навігаційній карті. Наприклад, у високонавантаженої зоні портової акваторії капітан зможе отримувати вказівки щодо безпечного маневру, враховуючи дані AIS (автоматичної ідентифікаційної системи) та прогноз течій.

3. Моделювання портових зон. Для високонавантажених акваторій, таких як порт Шанхай, модель може застосовуватися для прогнозування впливу навантаження на розходження суден. Наприклад, враховуючи, що у певний період у порту перебуває 20 суден, система здатна передбачити найбільш безпечні маршрути для кожного з них, мінімізуючи ймовірність затримок.

Приклад можливого моделювання: судно класу Panamax рухається до порту в умовах змінної течії та зустрічного вітру. Зона вхідного каналу має ширину 500 метрів, а навігаційне середовище містить три інші судна. Завдання — мінімізувати витрати пального та ризик зіткнення.

Етапи моделювання:

1. Збір даних. Вхідні дані включають:

Швидкість судна (v) — наприклад, 12 вузлів.

Течія (v_c) — змінна, наприклад, в діапазоні 1–2 вузли.

Вітер (v_w) — змінна, наприклад, до 15 вузлів.

2. Оптимізація траєкторії. Формула Беллмана (2) використовується для визначення оптимальної траєкторії, що зменшує час у дорозі та ризики.

3. Візуалізація результатів. На карті ЕКНІС відображається оптимальний маршрут судна з урахуванням змінних умов.

Висновки. Результати цього дослідження демонструють перспективність використання методу динамічного програмування для оптимізації процесу розходження суден в умовах стохастичних факторів навігаційного середовища. Основні досягнення включають:

1. Розробка концептуальної моделі. Використання формули Беллмана дозволило створити математичний інструмент, який враховує динамічну природу навігаційного середовища та ймовірнісні ризики;

2. Стохастичний підхід. Застосування ймовірнісних методів забезпечує адаптацію моделей до змінних умов, таких як течії, вітрові навантаження та присутність інших суден;

3. Практична значущість. Розроблені підходи можуть бути використані для вдосконалення систем підтримки прийняття рішень на судах, зокрема у високонавантажених портових акваторіях.

Подальші можливості дослідження можуть включати:

1. Інтеграція із системами штучного інтелекту. Використання алгоритмів машинного навчання для автоматичного коригування маршрутів у реальному часі. Це дозволить розширити функціональність моделей, забезпечуючи ще вищу адаптивність до змін умов;

2. Розширення бази даних. Збір додаткових даних про навігаційні умови у різних регіонах світу, включаючи мілководні та арктичні зони. Це дозволить вдосконалити стохастичну складову моделей;

3. Реалізація у симуляційних середовищах. Тестування запропонованих моделей на морських тренажерах для оцінки їх ефективності в реальних сценаріях;

4. Розробка інтерфейсів для ЕКНІС. Інтеграція моделей у електронні картографічні системи для оперативного відображення оптимальних маршрутів та ризиків у реальному часі;

5. Застосування в автономному судноплаванні: Подальший розвиток моделей може забезпечити їх використання у системах автономних суден, що мінімізує вплив людського фактора на безпеку судноплавства;

6. Аналіз економічної ефективності: Проведення детального аналізу економічної доцільності впровадження розроблених моделей, зокрема оцінка зниження витрат на паливо та ризиків затримок.

Таким чином, дослідження формує базис для подальших інновацій у сфері морської навігації. Інтеграція запропонованих підходів у практику забезпечить підвищення безпеки судноплавства, оптимізацію ресурсів та зменшення негативного впливу на довкілля.

Dubynets O.I., Maranov O.V.

OPTIMIZATION OF THE VESSEL'S PASSING PROCESS USING THE DYNAMIC PROGRAMMING METHOD TAKING INTO ACCOUNT STOCHASTIC FACTORS OF THE NAVIGATIONAL ENVIRONMENT

The article proposes a new approach to optimizing the process of preventing ship collisions using the dynamic programming method, which takes into account the stochastic nature of the navigation situation. A mathematical model of the divergence process is developed, which includes random environmental factors. A decision-making algorithm based on the Bellman optimality principle is proposed. Simulation modeling methods are proposed to confirm the effectiveness of the specified method for further research. The developed method potentially provides increased navigation safety in difficult conditions while minimizing control costs. The aim of the work is to develop a conceptual model for optimizing ship divergence using the dynamic programming method and analyze the impact of stochastic factors on the effectiveness of this process. The results of this study demonstrate the prospects of using the dynamic programming method to optimize the ship divergence process under stochastic factors of the navigation environment.

Keywords: navigation safety, vessel collision prevention, dynamic programming, stochastic factors, optimization, decision-making.

ЛІТЕРАТУРА

1. Цимбал Н.Н., Бурмака І.А., Тюпиков Е.Е. Гибкие стратегии расхождения судов. Одесса: КП ОГТ, 2007. 424 с.
2. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами размещением на параллельной линии пути. Одесса: Фенікс, 2013. 180 с.
3. Пятаков Е.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака І.А., Булгаков А.Ю. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения. Херсон: Гринь Д.С., 2015. 312 с.
4. Лісовскі Дж. Методи керування грою в системі підтримки прийняття рішень навігатором. Архів транспорту. 2005. № 3-4, Вип. XVII. Р. 133-147.
5. Статерос Томас, Хауеллс Гарет, Макдональд-Маєр Клаус. Концепції, технології та методи навігації автономного уникнення зіткнення суден. Я. Навіг. 2008. 61, № 1, с. 129-142.
6. Бурмака І.А. Управління судами в ситуації небезпечного зближення / І.А. Бурмака, Е.Н. Пятаков, А.Ю. Булгаков – LAP LAMBERT Academic Publishing, – Саарбрюккен (Німеччина), – 2016. – 585 с.
7. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении / А.С. Мальцев. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
8. Xu X. Modeling of Ship Collision Risk Index Based on Complex Plane and Its Realization/ X. Xu, X. Geng, YQ Wen //TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, № 2, 2016, С. 251-256.
9. Кім Д. Уникнення зіткнення суден за допомогою розподіленого пошуку табу / Д. Кім, К. Хіраяма, Т. Окімото // TransNav, Міжнародний журнал з морської навігації та безпеки морського транспорту, том. 9, № 1, С. 23-29, 2015.
10. Hornauer S. Trajectory Planning with Negotiations for Maritime Collision Avoidance / S. Hornauer, A. Hahn, M. Blach, J. Reuter // TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, № 3, 2015, С. 335-341.
11. Лісовскі Дж. Ігри та алгоритми прийняття рішень обчислювального інтелекту для уникнення зіткнень у морі/ Дж. Лісовскі // Праці. IEEE Int. конф. з технологій внутрішньої безпеки та безпеки. – 2005. – Гданськ. – Р. 71-78.
12. Петриченко Є.О. Розробка системи запобігання зіткненням з декількома цілями за допомогою еволюційних алгоритмів / Є.А. Петриченко // Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра. – 2014. – Всесвітній морський університет, Мальме, Швеція.
13. Zhang W. Maritime Collision Avoidance Path Planning by Dynamic Programming / W. Zhang, F. Goerlandt, P. Kujala // Безпека морського транспорту: морська навігація та безпека морського транспорту. – CRC Press, 2015. – С. 75-81.
14. Szlapczynski R. Новий метод планування маневрів уникнення зіткнень для ситуацій зустрічі з кількома цілями / R. Szlapczynski // Journal of Navigation. – 2008. – Вип. 61, № 2. – С. 307-321.
15. Там К. К. Алгоритми планування шляху для кораблів при зіткненні на близькій відстані / К. К. Там, Р. Бакнелл, А. Грейг // Журнал навігації. – 2009. – Вип. 62, № 3. – С. 455-472.