

Дудченко С.В., Литовченко В.І.

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ФОРМУВАННЯ БЕЗПЕЧНОГО ОПТИМАЛЬНОГО ЗА ЧАСОМ РУХУ МАРШРУТУ ПЕРЕХОДУ СУДЕН З УРАХУВАННЯМ ПРОГНОЗУ ПОГОДНИХ УМОВ

Управління рухом морських суден з використанням автоматичних систем, що дозволяють суттєво покращити показники якості та забезпечити безпеку плавання є невід'ємною частиною судноплавства сучасних умов. Нові шляхи вдосконалення систем автоматичного управління рухом здійснюється за рахунок широкого застосування передових комп'ютерних технологій. На даний момент однією з передових концепцій для створення систем автоматичного управління рухом є концепція e-Navigation та e-Voyage, як її частина. Сучасні судна можуть здійснювати плавання в складних погодних умовах, проте вітер, хвилі, течії та інші гідрометеорологічні фактори впливають на швидкість та маршрут суден, і як наслідок, на ефективність переходу. Рух судна з урахуванням погодних вимагає розробки оптимального маршруту переходу на основі прогнозів погоди, стану моря та індивідуальних характеристик судна для конкретних умов навігаційної обстановки. У визначених межах погодних і морських умов термін оптимальний використовується для позначення максимальної безпеки та комфорту екіпажу, мінімального споживання палива, мінімального часу на ходу або будь-якої бажаної комбінації цих факторів. У роботі удосконалено метод формування безпечного оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, що дозволяє підвищити ефективність за часом переходу судна з урахуванням прогнозу погодних умов при формуванні безпечного маршруту в системі e-Navigation. В удосконаленому методі реалізоване сумісне застосування математичного апарату нечітких множин та нечіткої логіки для визначення можливостей руху судна відповідно до впливу гідрометеорологічних умов. Запропонований підхід використовує гексагональну сітку для апроксимації району плавання та систему продукційних правил для визначення функції переходу між ними.

Ключові слова: e-Navigation, e-Voyage, маршрут переходу, маршрутизація за погодою, оптимізація рейсу.

Постановка проблеми. Відповідно до Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі (SOLAS) [1], розроблення плану переходу судна вважається критично важливим для безпечної навігації та уникнення небезпечних ситуацій. Наявні в ІМО [2] інструкції, морські карти та публікації, що застосовуються в судноплавстві і в концепції Е-навігації [3], використовуються для забезпечення безпеки та ефективної навігації суден.

Ефективна навігація містить формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, що визначається як оптимальна, відповідно до вибраного критерію (декількох критеріїв), лінія маршруту судна. У визначених межах гідрометеорологічних та інших умов навігаційної обстановки для переходу судна "оптимальний" означає максимальну безпеку, мінімальні витрати палива та час переходу або комбінацію цих факторів. Тому точність визначення оптимального маршруту залежить від таких чинників:

- точність прогнозування гідродинамічної поведінки судна за різних гідрометеорологічних умов;
- точність прогнозу погоди;
- можливість і практичність алгоритму оптимізації.

При формуванні безпечного оптимального за часом маршруту суден з урахуванням прогнозу погодних умов враховуються фактори часу і безпеки переходу. Фактор безпеки переходу пов'язаний із навігаційними небезпеками (глибинами, гідрометеорологічними умовами, перешкодами, тощо) на маршруті. До оптимальних відносяться маршрути, за якими можливий рух суден, забезпечується рівень безпеки для судна, вантажу екіпажу не нижче заданого, та є мінімальним за часом. Як правило, проблематика формування маршруту з урахуванням погодних умов моделюється як проблема досягнення мінімального часу переходу або проблема мінімального споживання палива з урахуванням існуючих. Як показує практика судноплавства, максимально короткий маршрут не завжди проходиться за мінімальний час. У загальному вигляді час переходу маршрутом визначається так:

$$T_{route}^{sh} = \frac{D_{route}^{W_{route}^{sh}}}{V^{sh}}, \quad (1)$$

де T_{route}^{sh} – час переходу судна;

$D_{route}^{W_{route}^{sh}}$ – довжина маршруту W_{route}^{sh} ;

V^{sh} – задана швидкість судна.

Враховуючи, що маршрут переходу складається з початкового, кінцевого та проміжних пунктів, між якими рухається судно з постійною швидкістю та курсом, то час переходу маршрутом визначається як

$$T_{route}^{sh} = \sum_{i=1}^N \frac{d_i^{W_{route}^{sh}}}{v_i^{sh}}, \quad (2)$$

де N – кількість пунктів маршруту W_{route}^{sh} ;

$d_i^{W_{route}^{sh}}$ – дистанція між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} ;

v_i^{sh} – швидкість судна між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} .

Відповідно до виразу (2), маршрут переходу судна визначимо множиною точок (пунктів) маршруту, що утворюють траєкторію судна, та пов'язаним з ними часом проходження (рис. 1).

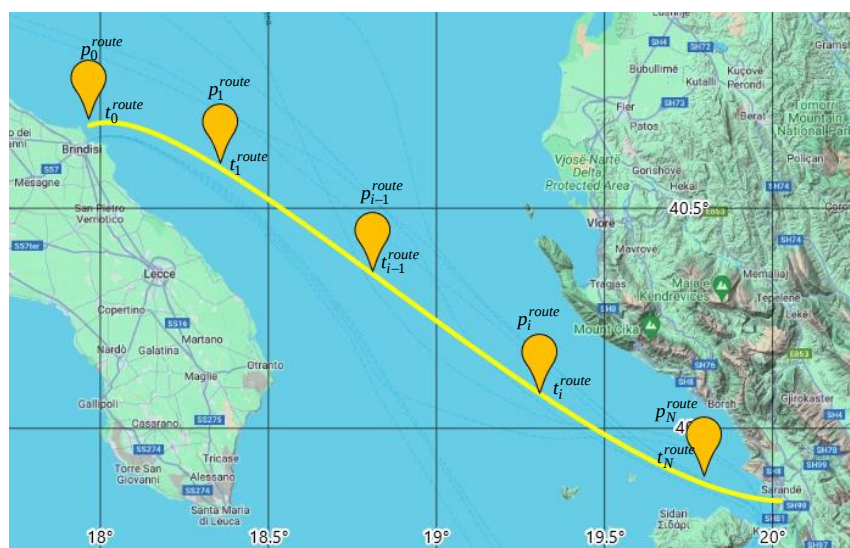


Рисунок 1 – Множина точок (пунктів маршруту), що утворюють траєкторію судна

Точка (p_i^{route}) пункту маршруту W_{route}^{sh} визначається вектором:

$$p_i^{route} = \left[Cord_i^{W_{route}^{sh}}, t_i^{route} \right], \quad (3)$$

який представляє довготу, широту та час відповідно проходження даного пункту маршруту.

Вектор управління судном задамо:

$$U^{ship} = \left[u_1^{sh}, \dots, u_{i-1}^{sh}, \dots, u_i^{sh}, \dots, u_N^{sh} \right] \quad (4)$$

при

$$u_i^{sh} = \left[v_i^{sh}, h_i^{sh} \right], \quad (5)$$

де v_i^{sh} – швидкість судна між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} ;

h_i^{sh} – курс судна між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} .

На швидкість руху судна впливають такі зовнішні фактори як сила та напрям вітру і течії, хвилювання. Вектор зовнішніх впливів визначимо:

$$INF_i = \left[inf_i^{wind}, inf_i^{curr}, inf_i^{wave} \right], \quad (6)$$

де $inf_i^{wind} = \left[\beta_i^{wind}, v_i^{wind} \right]$ – вектор, що визначає напрям (β_i^{wind}) та швидкість (v_i^{wind}) вітру судна між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} ;

$inf_i^{curr} = \left[\beta_i^{curr}, v_i^{curr} \right]$ – вектор, що визначає напрям (β_i^{curr}) та швидкість (v_i^{curr}) течії між

$(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} ;

$inf_i^{wave} = \left[h^{wave}, \beta^{wave} \right]$ – вектор, що визначає висоту (h^{wave}) та напрям (β^{wave}) хвиль між

$(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} .

Звідси випливає, що для формування оптимального за часом руху безпечного маршрут переходу судна необхідно вибрати в районі плавання такі точки пунктів маршруту з множини $p_1^{route} \dots p_i^{route}$, де вектор зовнішніх впливів $INF_1 \dots INF_i$, які дозволяють сформувати такий вектор управління U^{ship} , що досягається:

$$\begin{cases} T_{route}^{sh} \rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^N t_i^{route} \leq T_{dest}^{route}; \\ p_i^{route} \in MR, \quad i = \overline{1, N}. \end{cases} \quad (7)$$

де MR – район плавання в якому забезпечується рівень безпеки не нижче заданого;

T_{dest}^{route} – заданий час прибуття в кінцевий пункт маршруту.

Для алгоритму оптимізації маршруту переходу швидкість та курс судна в кожній точці пункту маршруту вибираються як змінні управління, які необхідно оптимізувати під час подорожі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботі [4] реалізована одночасна оптимізація курсу та швидкості судна для всього переходу в межах розрахункового часу прибуття, що забезпечує безпечне та енергозберігаюче плавання завдяки належному плануванню маршруту та швидкості. Пропонується модель одночасної оптимізації для курсу та швидкості судна на основі налаштованої версії алгоритму A*, оптимізація вирішується в симуляції.

У дослідженні [5] пропонується підхід до ідентифікації та характеристики маршрутів руху судна з використанням інформації, що міститься в повідомленнях автоматичної ідентифікаційної системи, які передаються суднами та записуються береговим центром служби руху суден. Підхід полягає у використанні архівних даних автоматичної системи ідентифікації для побудови графіка, де вузли є клітинками сітки, що охоплює географічну область, що вивчається, а ваги спрямованих країв обернено пропорційні руху суден між клітинками. Для визначення потенційно безпечного маршруту, який вважається найбільш використовуваним маршрутом між двома місцями використовується алгоритм Дейкстри.

У статті [6] пропонується метод оптимізації маршруту за часом та розкладу судноплавства шляхом включення часових вікон порту. Було розроблено математичну модель програмування, щоб мінімізувати загальні експлуатаційні витрати перевізника шляхом часової оптимізації послідовності заходу в порт, часу прибуття судна в порт заходу та швидкості руху на етапі переходу відповідно до обмежень часового вікна порту.

Метою дослідження [7] є визначення оптимального диверсифікації швидкості залежно від кількості вантажу на судні та стану вітру та моря. У цьому контексті були використані дані про однорічну подорож двох модельних однорідних вантажних суден, включаючи добову швидкість судна, добове споживання палива, споживання баластної води, загальне споживання вантажу судном, стан моря та стан вітру. Для визначення оптимальної швидкості різноманітності використовували метод генетичного алгоритму.

У роботі [8] оцінювалися служби "STM", які відносяться до категорії інформаційних систем призначених для покращення обміну інформацією між судном та берегом. Ці дослідження надає інформацію для центрів VTS, на які може вплинути впровадження e-Navigation.

У статті [9] авторами розроблений метод декомпозиції маршруту судна на глобальне та локальне планування за допомогою MATLAB і Simulink. У ході проекту "ROUTING" розглядається маршрутизація судна з урахуванням погодних умов та сучасний стан чисельного моделювання прогнозу погоди (NWP).

У роботі [10] пропонується ретельний огляд існуючих метеорологічних служб і детальна інформація про те, як отримати доступ до даних, які пропонують ці служби. Незважаючи на те, огляд виконувався на основі трансокеанських маршрутів суден, проте, він також буде корисним для ряду інших застосувань.

У дослідження [11] автори запропонувати метаевристичний алгоритм оптимізації бінарного рою частинок (BPSO), щоб отримати оптимізоване рішення для маршрутизації суден і планування транспортування зрідженого природного газу.

У дослідженні [12] пропонується метод формування маршрутів суден на інформації про попередні переходи. Інформація про попередні маршрути судна отримуються шляхом обробки даних AIS. Поворотні пункти маршруту судна згруповуються у вузли. Для створення оптимізованого маршруту використовувався алгоритм мурашиної колонії.

У статті [13] використовуються три різні алгоритми для порівняння продуктивності вирішення задачі комівояжера. Результати показують, що генетичний алгоритм забезпечує маршрут знаходження оптимального маршруту.

У статті [14] описано реалізацію комплексного програмного забезпечення "SIMROUTE" для маршрутизації судна з урахуванням погодних умов, яке називається. Для оптимізації

маршруту плавання як функції дії хвилі використовується алгоритм пошуку шляху A*. Програмне забезпечення надає комплексний, відкритий інструмент, що включає попередню та післяробку в при формуванні маршруту судна. Програмне забезпечення розроблено з урахуванням систем прогнозування хвиль CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service), які доступні для безкоштовного використання.

У роботі [15] розглядається проблем оптимізації швидкості переходу судна, залежних в умовах ліміту часу. Запропоновано авторами підхід застосовує схеми апроксимації. За допомогою експериментів перевірено ефективність запропонованого підходу з точки зору пошуку майже оптимальних рішень за короткий час обчислень.

Метою дослідження є підвищення ефективності за часом переходу судна з урахуванням прогнозу погодних умов при формуванні безпечного маршруту в системі e-Navigation.

Основні результати дослідження. На рис. 2 показано узагальнений процес оптимізації маршруту переходу судна, який складається з таких елементів:

- модель району плавання, а саме з врахуванням прогнозу змін гідрометеорологічних умов в районі плавання;
- модель судна: оцінка впливу навколишнього середовища на маневрені та технічні характеристики судна;
- обмеження: можуть бути залежними від часу чи ні, повинні бути задоволені при оптимізації маршруту (заборонені зони, канали, загальна тривалість рейсу, зміни потужності двигуна тощо) та безпеки (максимальні рухи судна та погодні умови);
- цілі: залежно від експлуатації судна, необхідно оптимізувати різні критерії, одночасно чи ні, такі як тривалість рейсу, споживання палива, безпека тощо.

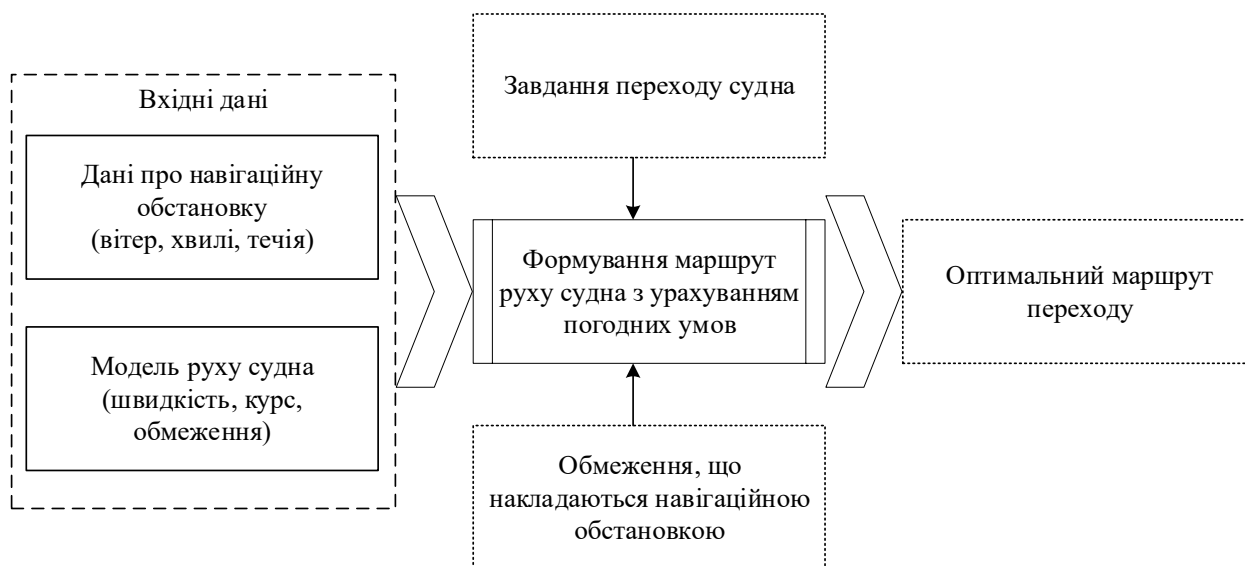


Рис. 2 – Узагальнений процес оптимізації маршруту переходу судна

При вирішенні завдання оптимізації накладаються обмеження, а саме, у поточній навігаційній ситуації навігації маршрут має відповідати:

1. Судно повинно йти в районі з достатньою глибиною води.
2. Судно не повинно плавати в умовах небезпечного вітру та хвиль.
3. План маршруту повинен враховувати динамічні гідрометеорологічних умов для дальнього та тривалого плавання.

4. Тривалість часового кроку зміни гідрометеорологічних умов, для моделювання навігаційної обстановки збігається з прогнозованим інтервалом в 1 годину. Даний інтервал дозволяє зробити припущення щодо стаціонарності цих умов. Функція керування (тобто швидкість і курс) є кусково-постійною протягом цього кроку часу. Прискорення не враховуються. Перехідні процеси, що пов'язані зі зміною керуючого впливу (наприклад, зміни

в режимі роботи двигуна), дуже короткі відносно масштабу часу, тому ними можна знехтувати. Компоненти опору руху судна, а саме: лобовий опір, опір повітря, диферентний або опір керму) не враховуються, оскільки вони є відносно невеликі за величиною.

5. Швидкість руху судна в стоячій воді називається швидкістю судна відносно води. Проте під впливом гідрометеорологічних умов навігаційної обстановки (вітер, хвилі та течії) судно не досягає заданої швидкості. Це впливає на рівень витрати палива за часом та на моделювання маршруту судна із врахуванням гідрометеорологічних умов. Дійсна швидкість судна з урахуванням впливу умов (швидкість руху судна відносно дна) визначимо як швидкість плавання.

У морській практиці замість того, щоб розглядати вплив на судно додаткового опору через криві зниження швидкості, які є функціями висоти хвилі та напрямку хвилі відносно швидкості судна, основними параметрами, що використовуються для розрахунку зниження швидкості судна, є висота та напрямок хвиль та коефіцієнт ефективності судна (рис. 3). Вплив хвиль на швидкість руху судна визначається виразом:

$$V_{wave}^{sh} = V^{sh} - \left(0,75h^{wave} - 0,275 \cdot \delta^{wave} \cdot h^{wave} \right) \times \left(1,0 - 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot M^{sh} V^{sh} \right), \quad (8)$$

де δ^{wave} – кут між напрямком хвиль та курсом судна;

M^{sh} – тоннажність судна.

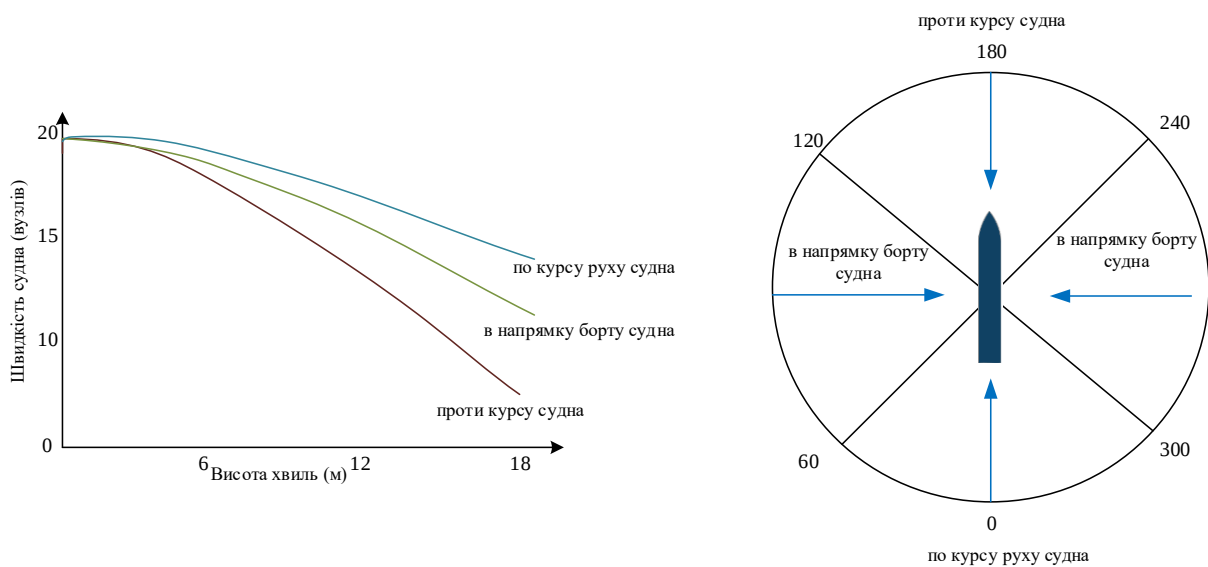


Рисунок 3 – Криві зниження швидкості, які є функціями висоти хвилі та напрямку хвилі відносно швидкості судна

Іншими факторами, що впливають на фактичний профіль швидкості судна під час переходу є глобальні океанічні циркуляції та поверхневі течії (важливі течії для морського судноплавства). У загальному вигляді співвідношення для визначення V_{curr}^{sh} у двовимірному просторі відповідно має вигляд:

$$V_{curr}^{sh} = \left| \overrightarrow{V^{sh}} - \overrightarrow{V_i^{curr}} \right|. \quad (9)$$

Сили та моменти вітру, що діють на корпус і надбудову судна, можуть значно впливати на досягнення певної швидкості. Співвідношення швидкості вітру V_i^{wind} та швидкості судна

відносно поверхні води V_{curr}^{sh} дозволяє визначити швидкість судна з урахуванням вітру V_{wind}^{sh} . У загальному вигляді співвідношення у двовимірному просторі відповідно має вид:

$$V_{wind}^{sh} = \left| \overrightarrow{V_{curr}^{sh}} - \overrightarrow{V_i^{wind}} \right|. \quad (10)$$

Швидкість руху судна, а отже, і його продуктивність, також суттєво залежить від умов експлуатації, геометрії судна, умов його навантаження, системи управління тощо. Також для забезпечення безпечної та ефективної експлуатації та навігації судна важливу роль відіграє адекватне моделювання судової рушійної установки. Проте, багато систем, спрямовані на забезпечення підтримки маршрутизації, використовують спрощені методи, щоб уникнути потреби в детальних даних та розрахунках. У зв'язку з цілим набором методів динаміка та рух судна розглядаються з різним рівнем деталізації, що відповідно впливає на продуктивність і прогноз на рух судна. Тому швидкість з урахуванням факторів навколишнього середовища покажемо так:

$$V_{INF}^{sh} = V_{wind}^{sh} - V_{wave}^{sh}. \quad (11)$$

При формуванні маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, також, зазвичай лише рівняння руху в поздовжньому напрямку. Отже, загальний опір судна має бути збалансований відповідною тягою гвинта. Як правило, нехтують силами поперечного дрейфу, що впливають на курс і необхідний кут керма, що створює зусилля на кермо та може додатково збільшити опір. Тому модель поздовжнього руху судна можна показати так, як зображено на рис. 4:

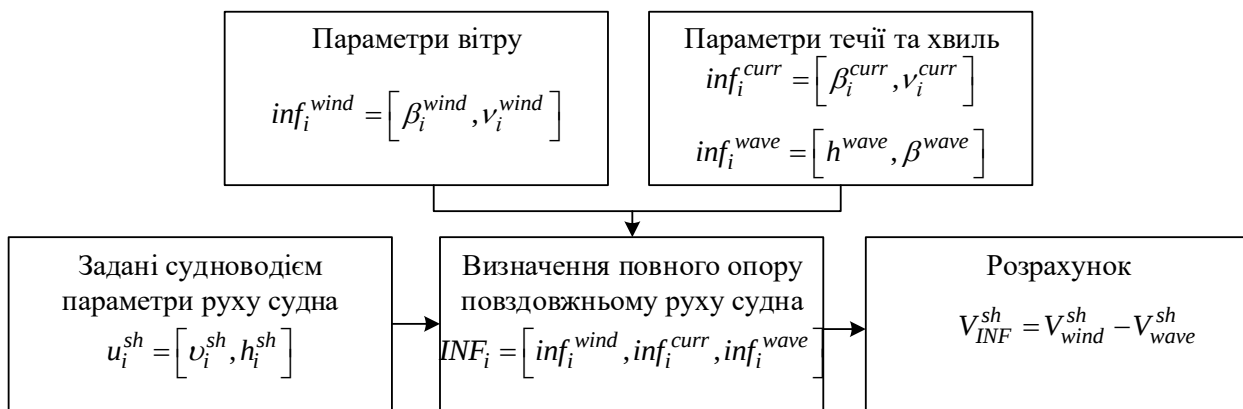


Рисунок 4 – Узагальнена модель поздовжнього руху судна

Швидкість судна V_{INF}^{sh} визначена керуючою змінною, яку потрібно оптимізувати в процесі маршрутизації для формування безпечного оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов. Час, що витрачається при планових та аварійних затримках, пропонується розраховувати додатково. Інформація про характер аварійних ситуацій та причини планових стоянок дозволить виявити найбільш вразливі у відношенні потенційні елементи часу процесу судноплавства.

Для формалізації моделі поздовжнього руху судна пропонується застосовувати математичний апарат нечіткої логіки. Основу нечітких продукційних моделей складає база знань, що застосовується для визначення впливу повного опору на поздовжній рух судна.

Узагальнений метод формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов в процесі планування та виконання переходу, показано на рис. 5.

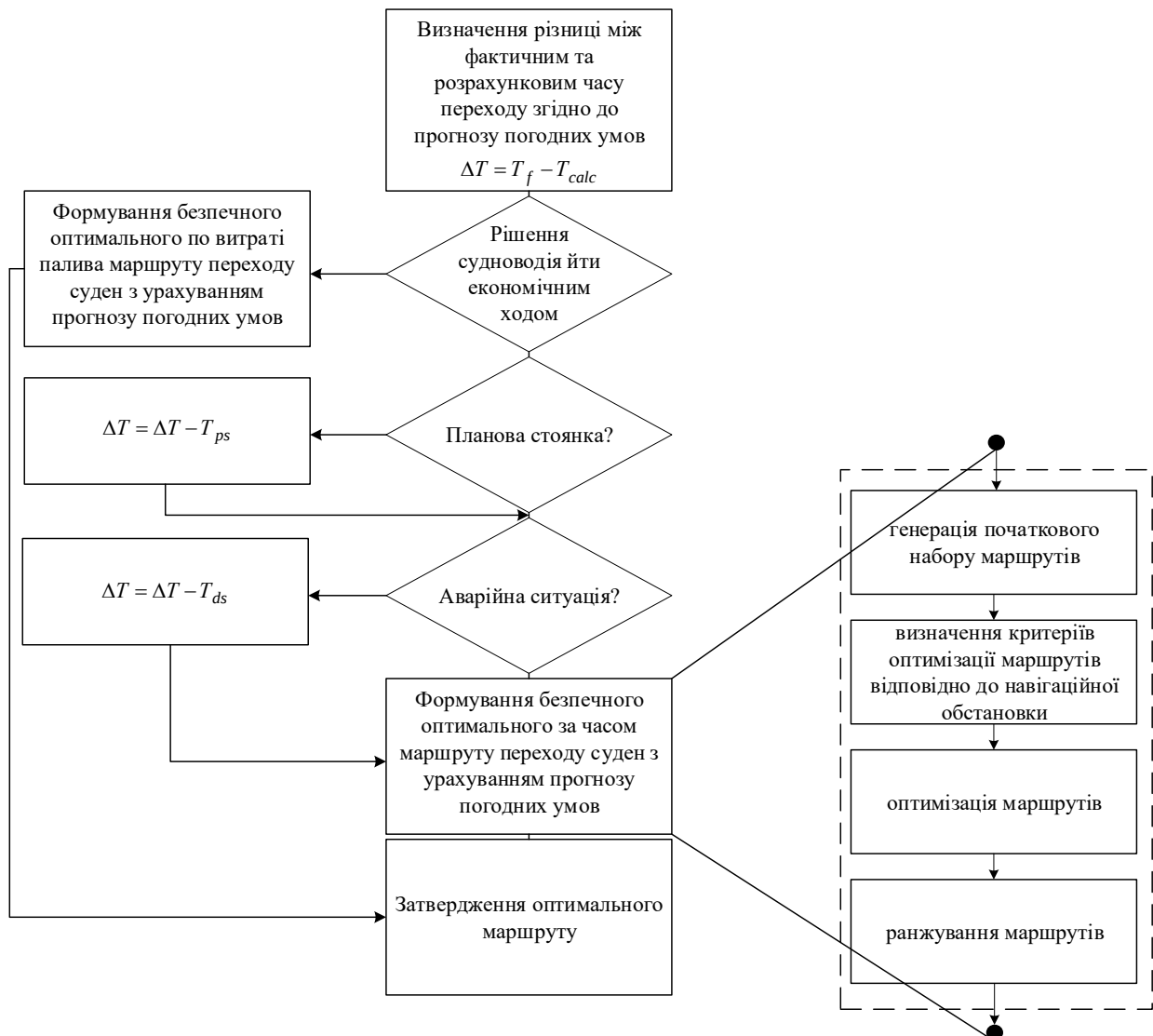


Рисунок 5 – Узагальнений метод формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов

Для генерації початкового набору маршрутів необхідно виділити область плавання (MR) між початковим та кінцевим пунктом переходу, яка містить усі допустимі маршрути переходу (W_i^{rec}):

$$MR = \sum_{i=1}^n W_i^{rec} . \quad (12)$$

Далі вирішується завдання геометричного покриття визначеної області плавання MR за алгоритмом покриття гексагональної сіткою [16] в декілька кроків.

Крок перший: координати поточного пункту знаходження судна задаються центром нульового гексагонального растру, а координати кінцевого положення судна – центром цільового гексагонального растру.

Крок другий: будується початковий та кінцевий гексагональний растр. Оскільки берегові служби оновлюють інформацію про гідрометеорологічну обстановку один раз на годину, то за

відстань між центрами сусідніх гексагональних растрів пропонується брати дистанцію, що проходить судно за одну годину (T^{hour}) з мінімальною швидкістю (V_{min}^{sh}) відносно поверхні землі. Звідси відстань (D^{geks}) від центру гексагонального растру до його сторони визначається формулою:

$$D^{geks} = V_{min}^{sh} \cdot T^{hour}. \quad (13)$$

Враховуючи властивість гексагональних растрів, а саме:

$$D^{geks} = l^{geks} \cdot \sqrt{3}, \quad (14)$$

де сторона гексагонального растру (l^{geks}) задається виразом:

$$l^{geks} = \frac{V_{min}^{sh} \cdot T^{hour}}{\sqrt{3}}. \quad (15)$$

Загальна структура гексагонального растру для створення гексагональної сітки визначеної області плавання *MR* має вид (рис. 6):

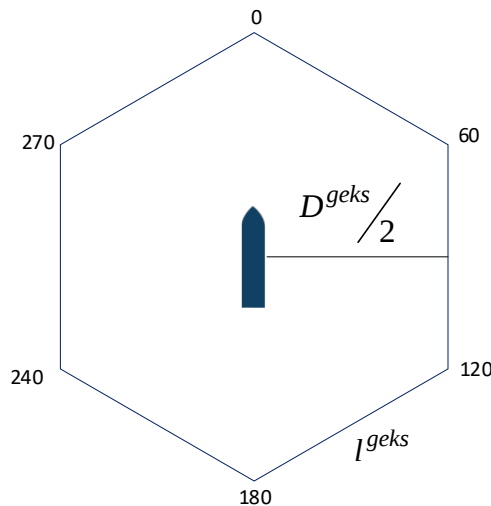


Рисунок 6 – Структура гексагонального растру для створення гексагональної сітки визначеної області плавання

Крок третій: Визначається орієнтація гексагональних растрів. Для даного етапу застосовуємо *pointy top* орієнтацію [16], що дозволяє орієнтувати гексагональні растри у напрямку руху судна до центру цільового гексагонального растру (рис. 7). Дане орієнтування гексагональних растрів дозволяє максимально вписати гексагональну сітку в область плавання *MR*.

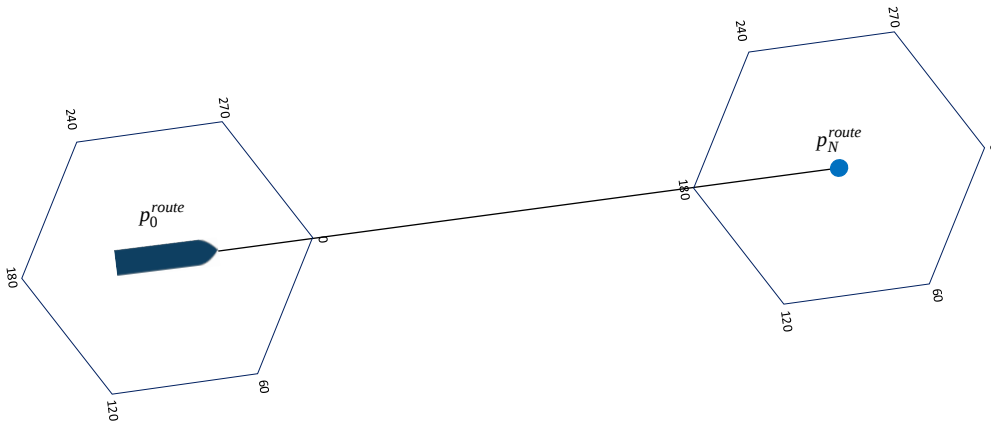


Рисунок 7 – Орієнтація початкового та кінцевого гексагонального растрів відповідно до напрямку центра цільового гексагонального растру

Крок четвертий: Виконується побудова гексагональної сітки в заданій області плавання методом осевих координат (рис. 8) [17].

Крок п'ятий: Виключення зі гексагональної сітки растрів що належать до області плавання зі складними (небезпечними) гідрометеорологічними умовами. Побудова маршрутів від початкового растру до цільового (рис. 8). Виконується методом формування векторів на гексагональному растрі. Для продовження маршруту вибирається той сусідній растр в якому при заданому курсі судна в растрі є $V_{INF}^{sh} \rightarrow \max$. Відповідно кожен растр задається кортежем:

$$G = \langle D^{geks}, l^{geks}, V_{INF}^{sh} \rangle. \quad (16)$$



Рисунок 8 – Генерація початкового набору маршрутів

Критерій, що застосовується для вибору оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов застосовується вираз (7). Проте, в якості обмеження судноводій може задати максимальну витрату палива в ході переходу по маршруту. Відповідно до значень T_{route}^{sh} виконується ранжування маршрутів та вибір оптимального судноводієм для прокладки. Після оновлення інформації про гідрометеорологічних умов в районі плавання виконується перерахунок V_{INF}^{sh} растрів та визначаються нові маршрути, якщо це потрібно.

Висновки. У роботі удосконалення методу формування безпечного оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, який на відміну від відомих використовує сумісне застосування математичний апарат нечітких множин та нечіткої логіки для визначення можливостей руху судна відповідно до впливу гідрометеорологічних умов. Запропонований підхід використовує гексагональну сітку для апроксимації району плавання та систему продукційних правил для визначення функції переходу між ними.

ЛІТЕРАТУРА

1. Топалов В.П. Конвенция СОЛАС-74. Основные положения и комментарии (Практическое пособие) / Одесса: Астропринт, 2002. 288 с.
2. R. Becker-Hei Webns Voyage Planning with ECDIS / Bremen: Geomares, 2016. 193 p.
3. Квасніков П.К. Концепція Е-навігації – навігації майбутнього. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту. Колективна монографія /за ред. В. Чимшира / Ізмаїл : ДІ НУ «ОМА» 2020 – Київ: Міленіум, 2020. 472 с.
4. Li, Y., Cui, J., Zhang, X., Yang, X. (2023) A Ship route planning method under the sailing time constraint. International journal on marine navigation and safety of sea transportation. Vol. 11, 1242-1267. DOI <https://doi.org/10.3390/jmse11061242>.
5. Silveira, P., Teixeira. A. P., Guedes Soares. C. (2019) AIS based shipping routes using the dijkstra algorithm. J. Mar. Sci. Eng. Vol. 13, No 3. P. 565-571. DOI: 10.12716/1001.13.03.11
6. Jiang, Xi, Haijun, Mao, Zhang, Hao (2020) Simultaneous optimization of the liner shipping route and ship schedule designs with time windows. Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2020. P. 1-11.
7. Baştürk, S., Erol, S. (2023) Optimizing ship speed depending on cargo and wind-sea conditions for sustainable blue growth and climate change mitigation. Journal of Marine Science and Technology. Vol. 28. P. 659-674.
8. Aylward, K., Johannesson, A., Weber, R., MacKinnon, S., Lundh, M. (2020) An evaluation of low-level automation navigation functions upon vessel traffic services work practices. WMU Journal of Maritime Affairs. Vol. 19. P. 313-335. DOI:10.1007/s13437-020-00206-y.
9. Kupraty, O., Tomera, M. (2023) Global and Local Planning of Ship Route Using MATLAB And Simulink. Journal of Marine Science and Technology. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation Vol. 17 No 1. P. 205-215. DOI:10.12716/1001.17.01.23.
10. Kupraty, O., Tomera, M. (2019) Review of weather forecast services for ship routing purposes. Journal of Marine Science and Technology. Polish maritime research. Vol. 26 No 4(104). P. 80-89.
11. Yazdi, A. K., Kaviani, M. A., Emrouznejad, A., Sahebi, H. (2020) Binary particle swarm optimization algorithm for ship routing and scheduling of liquefied natural gas transportation. The International Journal of Transportation Research. Vo. 12, No 4. P.223-232.
12. He, Y.K., Zhang, D., Zhang, J.F. & M.Y. Zhang. (2019) Ship route planning using historical trajectories derived from AIS data. The International Journal of Transportation Research. Vol. 13, No 1. P.69-76.
13. Li, X., Sun, B., Jin, J., Ding, J. (2022) Speed optimization of container ship considering route segmentation and weather data loading: turning point-time segmentation method. J. Mar. Sci. Eng., Vol 10, P.1835-1856. DOI: 10.3390/jmse10121835
14. Grifoll, M., Bor'en, C., Castells-Sanabra, M. (2022) A comprehensive ship weather routing system using CMEMS products and A* algorithm. Ocean Engineering. Vol 255, P.1-15. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.111427.
15. Sung, I., Nielsen, P. (2020) Speed optimization algorithm with routing to minimize fuel consumption under time-dependent travel conditions. Production & manufacturing research. Vol. 8, No. 1, P.1-19. DOI: 10.1080/21693277.2020.1732848.

16. Мельник, О.В., Романюк, О.Н., Котлик, С.В., Романюк, С.О. Чехмestрук, Р.Ю. (2022) Методи підвищення продуктивності формування векторів на гексагональному растрі. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. Vol. 14, Is. 3, P.28-39.
17. Ke, Y. (2023) Comparative analysis of path planning algorithms and prospects for practical application. Highlights in Science, Engineering and Technol. Vol. 52, P.202-207.

Dudchenko S.V., Lytovchenko V.I.

IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR FORMATION OF A SAFE OPTIMAL ROUTE FOR VESSEL PASSAGE TAKING INTO ACCOUNT THE FORECAST OF WEATHER CONDITIONS, OPTIMAL DURING TRAFFIC TIME

Management of the movement of sea vessels using automatic systems that allow to significantly improve quality indicators and ensure navigation safety is an integral part of shipping in modern conditions. New ways of improving automatic traffic control systems are implemented due to the wide application of advanced computer technologies. At the moment, one of the advanced concepts for creating automatic traffic control systems is the concept of e-Navigation and e-Voyage, as part of it. Modern ships can sail in difficult weather conditions, but wind, waves, currents and other hydrometeorological factors affect the speed and route of ships, and as a result, the efficiency of the passage. The movement of the ship taking into account the weather conditions requires the development of an optimal passage route based on weather forecasts, sea conditions and individual characteristics of the ship for specific conditions of the navigational situation. Within defined limits of weather and sea conditions, the term optimum is used to denote maximum crew safety and comfort, minimum fuel consumption, minimum underway time, or any desired combination of these factors. In the work, the method of forming a safe optimal route of the passage of ships taking into account the forecast of weather conditions, optimal in terms of movement time, has been improved, which allows to increase the efficiency of the passage time of the vessel taking into account the forecast of weather conditions when forming a safe route in the e-Navigation system. In the improved method, the combined application and mathematical apparatus of fuzzy sets and fuzzy logic is implemented to determine the possibilities of the ship's movement in accordance with the influence of hydrometeorological conditions. The proposed approach uses a hexagonal grid to approximate the swimming area and a system of production rules to determine the transition function between them.

Keywords: e-Navigation, e-Voyage, transit route, weather routing, voyage optimization.