

## МЕТОДИКА ТЕРМІНАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ВИСОКОШВИДКІСНИМИ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ З ЗАСТОСУВАННЯМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНО-ІГРОВОЇ ПАРАДИГМИ

*Розроблена методика структурного моделювання складної динамічної системи навігації і управління рухом високошвидкісних транспортних засобів. Наведено приклад розв'язку некооперативної диференціально-ігрової задачі з оптимізацією на швидкодю трьох гравців.*

*Разработанная методика структурного моделирования сложной динамической системы навигации и управления движением. Приведен пример решения некооперативной дифференциально-игровой задачи с оптимизацией на быстродействие троих игроков.*

*The methods of structural modeling of complex dynamic systems of navigation in the areas of responsibility, navigation systems and motion control were developed. An example of solutions noncooperative differential-game problem optimized for the performance of three players.*

**Вступ.** Складні динамічні системи (СДС) в зонах відповідальності інтегрованих сучасних систем навігації і управління рухом (СНУР) змінюють стани у наслідок впливів багатьох факторів зовнішнього середовища [1]. Забезпечення безпеки руху у зонах підвищеного ризику подій (ЗПРП) потребує врахування реальних факторів впливу зовнішнього середовища у різних формах прояву просторово-часової дії. Прогноз термінального управління в зонах навігаційного обслуговування об'єктів транспорту здійснюється методами математичного моделювання СДС [1, 9, 10].

**Сучасний стан досліджень.** Проблеми безпеки життя та руху активно досліджуються багатьма вченими для всіх видів транспорту [2-8]. Кожний конкретний високошвидкісний транспортний засіб (ВТЗ) відчуває суттєвий вплив навколишнього середовища відповідно погодно-кліматичним умовам у ЗПРП. Цей вплив на ВТЗ призводить до критичних динамічних навантажень на корпус та виконавчі механізми, обумовлює зниження швидкості руху і керованості, що сприяє іншим тяжким наслідкам. Тривимірний (3D) нерегулярний закон дії силу вітру та його фронту параметрично невизначений й може у межах певних нерівностей бути лише оцінений досвідом водія. Але уявний вплив суттєво залежить від швидкості руху та вектору курсу ВТЗ по відношенню напрямку розповсюдження хвильового фронту [11] у заданій ділянці транспортно-дорожнього комплексу (ТДК).

Таким чином шляхом вибору закону управління рухом ВТЗ можливо отримати кращі умови стосовно впливу дії факторів зовнішнього навколишнього середовища. Цілеспрямоване ухилення, віддалення від загроз резонансу (або іншого збігу негарездів) забезпечує переміщення в інший стан, який більш сприятливий, незважаючи на наявні небезпечні умови. Задача управління рухом ВТЗ на ділянках ТДК таким чином, щоб безпечно-гарантована траєкторія знижувала ризики впливу різноманітних природних

факторів дуже актуальна. Але для цього потрібен подальший розвиток методів структурного моделювання руху ВТЗ та оптимізації законів термінального управління у межах безкоаліційних диференціально-ігрових задач [7-10].

**Мета роботи.** Конкретизація задач оптимізації та особливостей загальної методики структурного моделювання диференціально-ігрових задач при моделюванні СНУР ВТЗ за умов дії різноманітних факторів поточних ситуацій у ЗПП, які можливо адекватно відобразити у класі безкоаліційних диференціальних ігор  $N$  учасників.

**Постановка задачі.** Пошук ефективних законів оперативного управління рухом ВТЗ у ЗПП повинен визначити безпечну гарантовану траєкторію, яка з'єднує початкові та термінальні навігаційні стани. У процесі динаміки змін координат рухомого ВТЗ на нього впливають  $N$  зовнішніх різноманітних факторів. Дії цих зовнішніх факторів можливо заздалегідь оцінювати у вигляді функцій від координат фазового простору стану. В даній роботі необхідно визначити типові мінімаксні стратегії управління. Навести стандартні критерії оцінки якості перехідних процесів. Проілюструвати метод побудови графа  $G(B,Q)$  для безкоаліційних диференціальних ігор  $N$  учасників. Зробити конкретний розв'язок задачі запропонованим методом та порівняти результати з тестовим аналітичним розв'язком задачі оптимізації на швидкодію, для прикладу  $N=3$ , коли кожний учасник діє незалежно від інших.

**Основний матеріал.** Доцільність синтезу оптимальних траєкторій руху ВТЗ в просторі обумовлена потребами практики підвищувати ефективність реалізації транспортної роботи. В залежності від конкретних задач, які фіксують критерії ефективності, можливі різні концептуально-семантичні цільові моделі (КСЦМ) [12] СДС як об'єкта моделювання. Типові класи оптимізаційних задач та відповідних їм КСЦМ характеризують мінімаксні цілі, наприклад:

- мінімум часу на перехід з одного стану по максимально вигідній траєкторії в інший – термінальний стан;
- мінімум витрат ресурсів (речовин, енергії, інформації) на реалізацію перетворень змін початкового стану по максимально якісній технології в цільовий – термінальний стан;
- мінімум похибок відхилення від програмної траєкторії – цільового стану до дозволеної межі контрольного граничного стану, який дозволяє максимально швидко повернутись на точну програмну траєкторію подальшого руху;
- мінімум ризику опинитись в іншому небажаному стані відносно бажаного еталонного стану за умов зміни динамічної взаємодії, що максимізує різницю між функціями у кожному з ідентичних станів;
- мінімум змін конструктивних параметрів на шляху переформування попереднього стану у наступний; кращий за отримання максимальної кількості цільових ефектів.

На даний час відсутня повна класифікація задач керування ВТЗ у диференціально-ігровій постановці. Однак КСЦМ даного класу задач відображає реальну сутність того, що конфігурація коротшого шляху у фазовому просторі відповідає оптимальній траєкторії диференціальної гри.

Сукупність локальних ділянок, де відбулись реальні переходи (трансформації, перетворення, зміни, переформування або акти зв'язку попереднього стану з наступним неідентичним й нетотожним йому станом), формують інтегровану оптимальну траєкторію, якщо вона відповідає заданим критеріям (вимогам, умовам, завданням) оптимальності у даній конкретній задачі навігації і управління рухом ВТЗ у реальній ЗППІ.

Слід підкреслити, що абсолютна оптимальність, це абстракція. Тому завжди можливо проводити дооптимізацію, уточнення, прилаштування під додаткові фактори, які до отримання розв'язку практичної задачі були відсутні, невідомі, невизначені. На практиці відрізняють задачі локальної, зональної та глобальної оптимізації, для яких критерії можуть бути суто різними. Наприклад, стан нормальної незбуреної експлуатації не співпадає зі станом передаварійного збуреного режиму чи зі станом кризової катастрофічної ситуації. Тому й різні цілі, критерії, задачі та алгоритми управління стосовно повернення на стан нормативної експлуатації та до відповідних траєкторій руху. Навіть суттєве наближення до нормативної (програмно-експлуатаційної) траєкторії дозволяє отримувати значний ефект. Його можна вимірювати розмірами тих витрат, що практично відбуваються у всіх тих випадках коли, як свідчить міжнародна статистика, відбуваються реальні аварії, небезпечні крупномасштабні стани, катастрофи у транспортній галузі [1].

Своєчасне запобігання критичної зони лиха, ухилення від небезпеки, віддалення від точки незворотної біфуркації забезпечує роботу вздовж безпечно-гарантованої траєкторії руху ВТЗ [1]. Але для цього необхідно з упередженням виконувати маневрені режими та здійснювати перехідні процеси за законами оптимального управління відносно початкового та термінального станів.

Оцінка якості під час означеної зміни станів можлива відповідно до критеріїв стандартного виду

$$J_1 = \int_{t_s}^{t_f} dt, \Delta t = t_f - t_s = t_k - t_o, \quad (1)$$

$$J_2 = \int_{t_s}^{t_f} (y(t) - y_c) dt, \quad (2)$$

$$J_3 = \int_{t_s}^{t_f} (y(t) - y_c) t dt, \quad (3)$$

$$J_2 = \int_{t_s}^{t_f} (y(t) - y_c)^2 dt, \quad (4)$$

$$J_2 = \int_{t_s}^{t_f} (y(t) - y_c)^2 t dt, \quad (5)$$

де:  $y(t)$  - траєкторія фактично реалізуемого руху по вимірюємій змінній за часом фізичних процесів у СДС;

$y_c$  - константа стаціонарного значення термінального стану, досягнення якого означає закінчення перехідного процесу на інтервалі від  $t_s = t_o$  до  $t_f = t_k$  з

заданою точністю вимірювань.

Якщо необхідно оцінювати витрати ресурсів на заданому інтервалі часу  $[t_s, t_f]$ , тоді інтегрований критерій оптимальності має вигляд

$$J_2 = \int_{t_s}^{t_f} \sum_{i=1}^n B_i(t) dt, \quad (6)$$

де:  $B_i(t)$  - значення ресурсу даного виду, який витрачається одночасно кожним  $i = \overline{1, n}$  засобом на даному інтервалі ресурсоспоживання для реалізації транспортної роботи.

Безкоаліційними диференціальними іграми називають такі динамічні ситуації у СДС, коли між учасниками (гравцями) немає поєднань у цільові коаліції з координацією спільних зусиль. Паралельні природні процеси, що реально здійснюють вплив на СДС (рух ВТЗ у оточуючому середовищі), можливо моделювати [9, 10] згідно теорії некоаліційних диференціальних ігор. В таких випадках кожний незалежний (на інтервалі моделювання) гравець реалізує власну гру без будь-якого узгодження зі станами та діями інших учасників гри [4-8].

Тобто, для першого гравця, яким є ВТЗ, можливі зміни впливів на нього з боку інших вищезначених гравців оцінені та задані (відомі), завдяки отримання необхідних даних з зовнішнього соціотехнічного середовища, що забезпечує навігаційне обслуговування зони руху.

За таких умов безпечно гарантована траєкторія першого гравця, яким є ВТЗ, формується оптимально з урахуванням принципу мінімакса

$$\min_{u_i} \max_{u_N \setminus i} J_i, \quad (7)$$

де:  $u_i$  - управління (управляючі дії)  $i$ -го гравця;

$u_N$  - множина управлінь  $u_N = (u_1, u_2, \dots, u_N)$  всіх гравців СДС;

$u_N \setminus i$  - сукупність управлінь всіх гравців за виключенням  $i$ -го гравця.

Приклад лінійної гри за критерієм (1) тобто на швидкість реагування. Нехай математична модель СДС має вигляд

$$\frac{dx}{dt} = a_{11}x + a_{12}y + \sum_{i=1}^N b_i u_i, \quad (8)$$

$$\frac{dy}{dt} = a_{21}x + a_{22}y + \sum_{i=1}^N c_i u_i, \quad (9)$$

де:  $x, y$  - координати стану об'єкта в фазовому просторі змін;

$u_i, \forall i = \overline{1, N}$  - управління всіх незалежних гравців на інтервалі моделювання;

$a_{ij}, \forall i, j = \overline{1, N}$  - параметри ваги взаємозв'язків між фізичними процесами у різних каналах СДС;

$b_i, c_i$  - відповідно степені впливу кожного  $i = \overline{1, N}$  виду управління на динаміку процесів вздовж  $x$  та  $y$  координат стану.

Задача полягає у знаходженні оптимальних управлінь першого гравця, яке забезпечує перехід стану СДС з початкового  $(x_0, y_0)$  у цільове термінальне  $(x_k, y_k)$  за мінімальний інтервал часу та умов максимально найгіршого збігу обставин, що моделюємо у вигляді можливих управлінських дій інших учасників безкоаліційної диференціальної гри, причому задані реальні обмеження

$$|u_i| \leq u_{im}, \forall i = 1, N, \quad (10)$$

де:  $u_{im}$  - максимальні на інтервалі моделювання значення управлінь гравців.

Розв'язок даної задачі починається з алгебраїчних перетворень. Представимо відповідно рівнянням (8) та (9) функціонал (1) в двох формах

$$J_x = \int_{x_0}^{x_k} \frac{dx}{a_{11}x + a_{12}y + \sum_{i=1}^N b_i u_i}, \quad (11)$$

$$J_y = \int_{x_0}^{x_k} \frac{dy}{a_{21}x + a_{22}y + \sum_{i=1}^N c_i u_i}. \quad (12)$$

Частинна похідна з рівнянь (8) та (9) визначається у вигляді

$$\frac{dy}{dx} = \frac{a_{21}x + a_{22}y + \sum_{i=1}^N c_i u_i}{a_{11}x + a_{12}y + \sum_{i=1}^N b_i u_i}. \quad (13)$$

Управління першого гравця з урахуванням (13) буде залежати від  $(N-1)$  гравців

$$u_1 = \frac{1}{b_1 \frac{dy}{dx} - c_1} \left\{ a_{21}x + a_{22}y + \sum_{i=2}^N c_i u_i - \right. \\ \left. - \frac{dy}{dx} \left( a_{11}x + a_{12}y + \sum_{i=2}^N b_i u_i \right) \right\}, \quad (14)$$

де:  $\left( b_1 \frac{dy}{dx} - c_1 \right) \neq 0$  умова на розв'язок задачі.

Подальший алгоритм розв'язку задач вищеозначеного класу будемо ілюструвати на конкретному прикладі.

Рівняння (8) та (9) для обраного прикладу розглянемо при наступних значеннях  $a_{11} = a_{21} = a_{22} = 0$ ;  $a_{12} = -1$ ;  $b_i = 0$ ;  $c_1 = 5$ ;  $c_2 = 2$ ;  $c_3 = 1$ ;  $i = \overline{1, 3}$ .

Динаміка зміни станів (8) та (9) тоді набуде вигляду

$$\frac{dx}{dt} = -y, \quad (15)$$

$$\frac{dy}{dt} = 5u_1 + 2u_2 + u_3. \quad (16)$$

Причому на управління гравців накладені обмеження  $|u_i| \leq 1, \forall i = 1, 2, 3$ .

Плата даної оптимальної гри буде визначатись функціоналом

$$J_y = \int_{t_0}^{t_k} dt, \forall i = 1, 2, 3. \quad (17)$$

Початкові умови даної гри задані:

$(t_0 = 0, x_0 = 4, y_0 = 0)$  для початкового стану,

$(t_k = , x_k = y_k = 0)$  для термінального стану.

Фазовий простір станів  $(X, Y)$  даної гри дискретизуємо кроком  $h_x = h_y = 1$  з квадратною решіткою (рис.1).

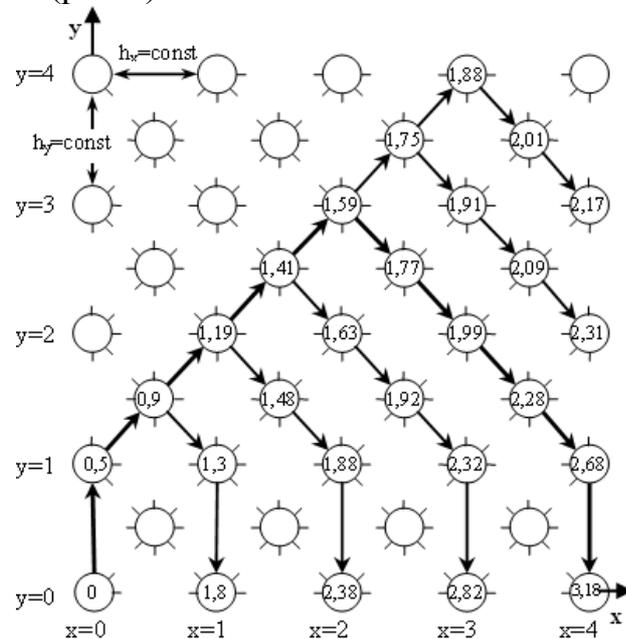


Рис.1. Дискретна прямокутна решітка графа  $G(B, Q)$

Дискретна прямокутна решітка графа  $G(B, Q)$ , який покриває простір фазових станів СДС та визначає переходи між вузлами, що задовольняють всім вимогам задачі термінального управління у вигляді безпечно-гарантованої траєкторії руху ВТЗ (жирна суцільна лінія кусково-лінійної апроксимації). У кружках (вузлах) дані значення (сумарного часу  $t_i$ ) витрат на перехід від початкового стану  $t_0$  до поточного.

У даній задачі похідна (13) отримує функціональний вигляд

$$\frac{dy}{dx} = -y^{-1} [5u_1 + 2u_2 + u_3]. \quad (18)$$

Також, функціонал плати, що має форми (11) та (12), отримує вигляд

$$J_x = -\int_{x_0}^{x_k} \frac{dx}{y}, \quad (19)$$

$$J_y = -\int_{x_0}^{x_k} \frac{dy}{5u_1 + 2u_2 + u_3}. \quad (20)$$

Мінімальне значення функціонал (20) приймає у випадку граничних управлінь гравців у вигляді двох наборів

$(u_1 = 1, u_2 = -1, u_3 = -1)$  для першого,

$(u_1 = 1, u_2 = -1, u_3 = -1)$  для другого.

Кожний з цих наборів управлінь гравців приводить часткову похідну (18) до вигляду

$$\left| \frac{dy}{dx} \right| = \frac{2}{y}. \quad (21)$$

Прямокутний граф решітка  $G(B, Q)$  можливо чисельно визначити згідно (Рис. 1) наступних умов

$$0 \leq \left| \frac{dy}{dx} \right| < \frac{hy}{2hy} - \text{горизонтальна гілка}, \quad (22)$$

$$\frac{hy}{2hy} \leq \left| \frac{dy}{dx} \right| < 2 \frac{hy}{hy} - \text{діагональна гілка}, \quad (23)$$

$$\left| \frac{dy}{dx} \right| < 2 \frac{hy}{hy} - \text{діагональна гілка}. \quad (24)$$

Конкретна вага горизонтальної гілки графа  $G(B, Q)$ , для якої виконується умова (22), розраховуємо за формулою (19). Аналогічно вага горизонтальної гілки, що поєднує стан при  $(x_j, y_i)$  з сусіднім станом  $(x_{j+1}, y_i)$ , визначається наступним співвідношенням

$$\Delta J_{im} = \frac{1}{y_i}. \quad (25)$$

Всі горизонтальні гілки графа  $G(B, Q)$ , для яких не виконується умова (22), повинні бути заборонені (немає зв'язку). За умов даної задачі всі горизонтальні гілки вздовж вісі абсцис (для якої  $y_i = 0$ ) та паралельні їй рівні  $\forall i = 1, 2, 3, 4$  визначаються забороненими (або їх вага дорівнює нескінченності, що еквівалентно неспроможності переходу такими гілками). На рис. 1 такі відключені гілки позначені штриховою лінією.

Вага діагональних гілок графа  $G(B, Q)$ , для яких виконуються умови (23) обчислюється за формулою

$$\Delta J_{km} = \frac{1}{a_{11} + \alpha a_{12}} \times \times \ln \left| \frac{(a_{11} + \alpha a_{12}) B_{m+1} + a_{12} \beta_k + \sum_{i=1}^N b_i (\pm u_{im})}{(a_{11} + \alpha a_{12}) B_m + a_{12} \beta_k + \sum_{i=1}^N b_i (\pm u_{im})} \right|. \quad (26)$$

У даному прикладі з урахуванням умов задачі (15) та (16) вираз (26) отримує вид

$$\Delta J_{km} = \ln \left| \frac{B_{m+1} + \beta_k}{B_m + \beta_k} \right|. \quad (27)$$

З урахуванням масштабів  $h_x = h_y = 1$  рівняння (27) набуває вид

$$\Delta J_{km} \ln \left| \frac{x_{i+1} + 1}{x_i + 1} \right|, \quad (28)$$

де діагоналі квадратних сотів враховують послідовність проєкцій вершин у порядку  $x_i = (0, 1, 2, 3)$  та  $x_{i+1} = (1, 2, 3, 4)$ . Таким чином, діагональні гілки графа

$G(B, Q)$ , вершини яких знаходяться на вісі абсцис ( $Y_i = 0$ ), а також коли рівень  $y_i \geq 4$ , повинні бути заборонені, тому що порушуються умови (23). На рис. 1 такі діагоналі пусті – відсутні.

Вага вертикальних гілок графа  $G(B, Q)$ , для яких виконуються умови (24), обчислюється за формулою (20). Для цього необхідно підставити набори граничних значень управлінь ( $u_1 = 1, u_2 = -1, u_3 = -1$ ) або рівня 0,5 тобто однакова для всіх, які заключні між рівнями  $y = 0$  та  $y = 1$ . Всі інші вертикальні гілки, що вище рівня  $Y > 1$  будуть заборонені, тому що умова (24) порушується. На рис. 1 такі вертикальні гілки відсутні.

Після завершення чисельного визначення плати по дозволеним (горизонтальним, діагональним, вертикальним) гілкам графа  $G(B, Q)$  можливо переходити до розв'язку задачі шляхом знаходження найкоротшого шляху з початкового стану ( $x_0 = 4, y_0 = 0$ ) у термінальний ( $x_k = y_k = 0$ ) стан. На рис. 1 дерево найкоротшого шляху зображено жирною лінією, яка апроксимує безпечно-гарантовану траєкторію. З метою підвищення точності розв'язку доцільно моделювати ще й додаткові (вершини) вузли графа, які формуються як перетин діагоналей прямокутних сот решітки. Перевірка умов існування ділянок переходу визначає значну кількість заборонених.

Вузли графа надають чисельні значення часу, необхідного для гарантованого переходу стану гри з початкового стану у даний стан за рахунок цілеспрямованого управління першого гравця, а також при максимальній протидії з боку (у даній задачі) другого та третього гравців.

Верифікація запропонованого методу проводиться шляхом порівняння з аналітично точним розв'язком.

$$\begin{aligned} y^2 &= 4x, \text{ при } 0 \leq x \leq 2, \\ y^2 &= 16 - 4x, \text{ при } 2 \leq x \leq 4. \end{aligned} \quad (29)$$

На рис. 2 отримана кусково-лінійна апроксимація траєкторії (29) зображена суцільною лінією. Точний розв'язок (29) у графічному вигляді відображено пунктирною лінією.

Управляючі дії гравців вздовж найкоротшого шляху у фазовому просторі співпадають з точними значеннями оптимальних стратегій гравців (рис. 2).

Ціна (плата) гри, яка визначає значення тривалості часу переходу станів гри з початкового у термінальній, для аналітично точного розв'язку дорівнює  $\Delta t = t_k - t_0 = \sqrt{8} \approx 2,82842$ . Для великих кроків дискретизації  $h_x = h_y = 1$  наближена оцінка складає 3,18 одиниць часу з відображенням точної симетрії відносно вертикальної лінії переключення при значенні  $x = 2$ . Слід зазначити, що сусідня точка з термінальною, яка віддалена лише на один крок дискретизації  $h_x$ , визначає варіант  $\Delta t' = 2,82$  але з асиметричним шляхом. Саме це підкреслює, що розрахункові стрибки (-1 → +1 або навпаки) без запізнь це абстракції. Вона спрощує розрахунки, але й впливає на реальну траєкторію руху ВТЗ.

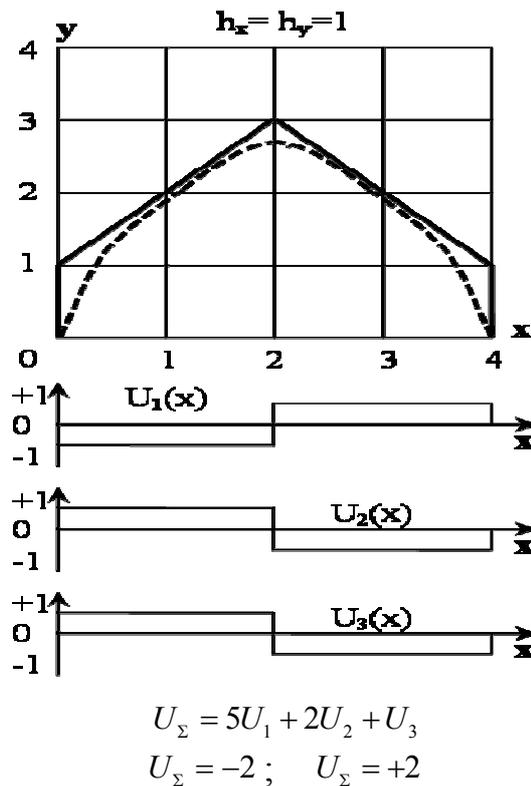


Рис. 2. Порівняння траєкторій методу апроксимаційного розв'язку (суцільна) з аналітичним (пунктирна) при співпадінні законів управління трьох гравців та заданих обмежень.

Всі фізичні високошвидкісні процеси мають певні запізнення на реалізацію зміни закону управління. Крім того, природні фактори практично не синхронізовані з великою точністю. Зроблені коментарі підкреслюють звичайну розбіжність між математичною моделлю та реальним об'єктом СДС.

Для практичних задач головним є швидкість одержання розв'язку – оцінки, яка визначає прийняття рішення стосовно першочергової дії, а саме зберегти безпеку життя, руху, та ефективності віддалення від зони ризику загрозливих подій. Тому упереджений прогноз, як розв'язок безкоаліційної диференціально-ігрової задачі у прискореному масштабі часу, гарантує якість навігації і управління рухом ВТЗ у екстремальних обставинах.

### Висновки.

1. Моделі безкоаліційних диференціальних ігор з багатьма учасниками динамічного розвитку ситуацій у межах складної динамічної системи є адекватними реальному об'єкту системи навігації і управління рухом транспортних засобів в зоні підвищеного ризику подій у наслідок можливих загрозливих впливів факторів навколишнього середовища.

2. Єдина методика дискретизації фазового простору, та знаходження безпечно-гарантованої траєкторії руху ВТЗ дозволяє отримувати розв'язок оптимізаційної задачі з урахуванням різних мінімаксинх критеріїв реалізації відповідних законів управління, що особливі для кожного незалежного гравця.

3. Процедура виключення заборонених гілок з повного графа, що накриває

фазовий простір даної задачі, суттєво зменшує область пошуку. Це значно прискорює час отримання розв'язку та відповідних оцінок, необхідних для прийняття оптимальних рішень системою навігації і управління рухом ВТЗ на ТДК.

### Література

1. Баранов Г.Л. Активне визначення безпечно-гарантованої траєкторії шляхом структурного моделювання диференціально-ігрових задач в системах навігації і управління рухом об'єктів водного транспорту / Г.Л. Баранов, В.І. Тарасюк, С.М. Васько // Системи управління, навігації і зв'язку. – К.: ЦНДІНУ. 2011. – Вип.2(18) С. 14-18.
2. Баранов Г.Л. Рівні інтелектуалізації бортового багатофункціонального комплексу управління рухом в інтелектуальних транспортних системах / Г.Л. Баранов, В.Л. Міронова, В.І. Тарасюк // Вісник Національного транспортного університету: В 2-х частинах: Ч. 2. – К.: НТУ, 2010 – Випуск 21. С. 73-77.
3. Энциклопедия безопасности авиации / Н.С. Кулик, В.П. Харченко, М.Г. Луцкий и др. / под ред. Н.С. Кулика. – К.: Техника. 2008 – 1000 с.
4. Голечков Ю.И. О математическом моделировании безопасного движения по неровному пути колесного транспортного средства / Ю.И. Голечков, А.А. Шестаков, И.А. Ефимов // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем –М.: 2007. Вып.9. С. 66-73.
5. Дмитриев С.П. Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории / С.П. Дмитриев, А.Е. Пелевин – СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2002
6. Кудряшов В.Е. Синтез алгоритмов безаварийного управления судном при расхождении с несколькими объектами // Судостроение – 1978. - №5.
7. International bulkier journal – 2001 -16. №7. – P.73-75.
8. Воробьев А.А. Оценивание защищенности автоматизированных систем на основе методов теории игр // А.А. Воробьев, Г.В. Куликов, А.В. Непомнящих // Информационные технологии (приложение). – М.:Новые технологии, 2007. - 24 с.
9. Цыбмал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов. / Н.Н. Цыбмал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков // - Одесса. КПОГТ. 2007. – 424 с.
10. Баранов Г.Л. Структурное моделирование динамических и дифференциально-игровых систем / Г.Л. Баранов, В.Л. Баранов // Препринт-485, Киев, АН УССР, Институт электродинамики, Киев. 1987. – 55 с.
11. Баранов Г.Л. Структурное моделирование дифференциально-игровых систем и объектов / Г.Л. Баранов, В.Л. Баранов // Препринт-600, Киев, АН УССР, Институт электродинамики, Киев. 1989. – 48 с.
12. Мирошников А.Н. Стандартные методы управления движением судов и кораблей и эволюция методов их решения / А.Н. Мирошников // Навигация и управление движением, сб. докл. / н.-т. конф. молодых ученых, СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 1999, - С.143-154.
13. Баранов Г.Л. Структурное моделирование сложных динамических систем / Г.Л. Баранов, А.В. Макаров // – К.: Наук. Думка, 1986. – 272 с.