

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 521.182+521.184]:629.783+519.622

Баранов Г.Л., Прохоренко О.М.,
Національний транспортний університет, м. Київ, Україна**КОНСТРУКТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ ЗА ПАРАДИГМОЮ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ГРИ**

Розроблена методика комплексного структурного моделювання складної динамічної системи гарантовано адаптивного управління об'єктів авіаційно-космічних технологій в умовах ризику та невизначеності факторів впливу природного зовнішнього середовища. Наведене структурно-функціонне забезпечення комп'ютерних засобів для розв'язку диференціально – ігрових задач N-гравців. Визначено умови безпечно-гарантованих траєкторій руху мобільних об'єктів з урахуванням одночасно спільної нелінійної дії N-гравців.

Ключові слова: безпечна траєкторія руху МТЗ, диференціально-ігрова апроксимація, без коаліційні рішення, зміни ситуацій, почергове управління, ресурси АКТ.

Вступ. Підсистеми моделювання динаміки функціонування об'єктів авіаційно-космічних технологій (АКТ) застосовують різні полієргатичні виробничі організації ПЕВО у якості спеціалізованих систем підтримки прийняття рішень (СППР) [1-3]. Значна складність об'єктів АКТ та ракетно-космічної техніки (РКТ) вимагає від засобів їх моделювання завчасного (швидкого), повного (гарантовано-точного), ефективного (за мінімальних витрат ресурсів) отримання безпечних траєкторій руху конкретного маневреного транспортного засобу (МТЗ) в природних (звичайних, типових, надзвичайних) умовах впливу факторів зовнішнього навколишнього оточуючого середовища (ЗНОС) [1,2].

Звичайна обмеженість наявних TESIMFO ресурсів [2] додатково ускладнює методичне, математичне, програмне, інформаційне та техніко-технологічне забезпечення, що гарантує якість системного аналізу завдань, проектування необхідних зразків, випробування життєздатності компонент та синтезу нових структур відповідно унікальних конструктивних рішень стосовно актів дії у динамічних умовах, близьких до невизначених природних.

Унікальність кожної з космічних програм міжнародної кооперації полягає у нових наукових й практичних засобах функціонування вузлів, компонент, агрегатів, комплексів й систем інноваційної складної динамічної системи (СДС) [3-5].

Постановка проблеми. Удосконалення існуючих і створення нових об'єктів майбутньої АКТ й РКТ пов'язано з реалізацією важливих стратегічних завдань, наприклад національної космічної програми України [6]. Пошук конструктивних комплексних методів (ККМ) моделювання СДС для майбутніх інноваційних АКТ й РКТ безумовно є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сутність, особливість та специфіку процесу руху твердого тіла в просторово-часовому континуумі

(ПЧК) з активним впливом факторів впливу ЗНОС досліджувала дуже велика когорта закордонних і вітчизняних вчених [5-15]. Найбільш вагомий недолік відомих бортових програмно-апаратних комплексів (ПАК з використанням наявних сучасних багато ядерних процесів) пов'язаний з необхідністю витрат значних обчислювальних ресурсів [14] у режимах реального часу маневрування у зонах підвищеного ризику подій (ЗППП). Реальні запізнення на формування раціонального (безпечного корисного, ефективного) закону гарантовано-адаптивного управління (ГАУ) рухом МТЗ впливають на почергові акти дії з запобігання зіткнень, ухилень від небезпек, попередження аварій та катастроф [1-5] кожної конкретної ЗППП на траєкторних маршрутах здійснення місії у ПЧК. Конструктивне подолання визначеного протиріччя між теоретичними можливостями тривалих наукових пошуків оптимального синтезу засобів ГАУ МТЗ [11,13,15] та реальними TESIMFO обмеженнями наявних ресурсів [14] бортових ПАК в режимах позаштатного екстреного маневрування [15] можливе лише за новою парадигмою прискорених символічних обчислень для СППР в АКТ.

Мета роботи полягає у розробці методики конструктивного моделювання об'єктів АКТ і РКТ з ефективним відображенням складної динамічної системи гарантованого адаптивного управління для активного формування програмно-безпечних траєкторій руху МТЗ в умовах ризику загрозливого впливу природних факторів ЗНОС. Умови багатозначних форм безпеки життя й функціональної стійкості ієрархічного управління гарантуємо за процедурами розв'язку диференціально-ігрових задач для N-гравців [12,13].

Постановка завдання. У процесі тривалого подолання ПЧК завжди природно існують ЗППП, коли фактори форс мажорних обставин набувають небажаних рівнів загроз для життя у формах катастрофічного руйнування МТЗ. Безпечно

гарантована траєкторія така, яка з'єднує початкові та термінальні цільові позиції неперервним чином. Вона на протязі усього маршруту під час ситуативної динаміки змін координат, буде задовольняти всім багатозначним критеріям функціональної стійкості. Якщо відповідна трубка з ε околom внутрішнього маневрування знаходиться на значних δ відстанях до максимальних градієнтів загроз, завад, збурень факторів ЗНОС, тоді які на деяких локальних напрямках програмний рух лише наближається до життєдіяльності області застосування АКТ.

Таким чином задача забезпечення неперервної у заданому ПЧК траєкторії рухом МТЗ майбутньої АКТ за всіма багатозначними N критеріями безпеки, якості та ефективності формулюється як пошук одночасно стратегічного, тактичного й локально оперативного розв'язку в умовах актів дії N -гравців незалежного, необмеженого, невизначеного ЗНОС.

Основний матеріал дослідження.

Конструктивне моделювання СДС починається з базових визначень стосовно відношень між реальним природним об'єктом АКТ й РКТ та спрощеними цільовими частковими моделями. Адекватні робочі моделі забезпечують отримання корисного результату шляхом розв'язку відповідної конкретної задачі у межах комплексної складної задачної системи за потреб й вимог практики ПЕВО [3].

Пошук спрощених але результативних моделей СДС залежить від ефективності декомпозиції завдання на складові під задачі єдиної задачної системи. Відповідно ієрархічним рівням паралельних актів [14] дії автономного виконання визначаємо складові (вершини) на горизонтальних рівнях угруповання. Парні з'єднання вершин сусідів (ребра, гілки, шляхи) обов'язкові для ієрархічних форм обміну інформаційними сигналами за взаємозалежними мережними каналами інтеграції або спілкування [3, 12, 13] у ПЧК.

Формалізація цілей під задач. В залежності від конкретних задач ПЕВО, які застосовують АКТ й РКТ, можливі різні конкретизації кожної концептуально-семантичної цільової моделі (КСЦМ) СДС, як об'єкта моделювання. У нашому дослідженні (рис.1) доцільно формалізувати КСЦМ диференціальної гри згідно мінімаксними цілям типових тривіальних задач (ТТЗ) [4, 5], наприклад:

- мінімум витрат часу $\min_{i \in t} t = \sum \Delta \tau_i$ на

тривалий ситуативний вздовж максимально привабливої $\max_{j \in t} P = \sum \Delta P_j$ безпечної траєкторії

перехід з одного S_0 в інший S_n стан;

- мінімум витрат (речовин, енергії, інформації, фінансів, кадрів) наявних ресурсів на реалізацію перетворень для змін попереднього $(i-1, i)$ стану по максимально якісній, ефективній,

безпечній траєкторії для досягнення наступного $(next\ i + 1)$ термінального стану;

- мінімум похибок (без помилок при заданій достовірності) відхилення від обґрунтованої за правилами безпечної траєкторії з означеним околom цільового $(next)$ стану, який дозволяє максимально швидко повернутися на точну програмну (заздалегідь обґрунтовану) траєкторію подальшого руху МТЗ;

- мінімум ризику (risk) опинитись в іншому небажаному стані (пастка, лихо, форс-мажор) відносно безпечних бажаних еталонних якостей станів динамічної взаємодії за умов максимізації часових й просторових відстаней між загрозами, завадами, збуреннями факторів ЗНОС та корпусом й околom безпеки даного МТЗ;

- мінімум змін конструктивних параметрів засобів ГАУ МТЗ на процедурах переформування, переналадження, трансформації попереднього стану у наступний, більш кращий згідно максимальної прибутковості у термінальному стані за сукупністю відношень (якості результату – обсяги TESIMFO витрат) першочергових ефектів.

Наведений приклад часткових цілей не вичерпує можливі подальші форми КСЦМ. На даний час відсутня повна класифікація задачних систем та ТТЗ для АКТ й РКТ за парадигмою диференціальних ігор. КСЦМ дозволяють стверджувати, що оптимальна інтегрована траєкторія диференціальної гри відображається найкоротшим шляхом у відповідному фазовому просторі багато критеріальних оцінок обсягів витрат TESIMFO ресурсів [2, 4, 5, 13].

По кожному можливому критерію вибір серед інших оцінок відбувається за принципом отримання максимально можливого при мінімальних витратах, частки вирішального ресурсу. Тому інтегрована (сукупна з локальних ділянок ПЧК) траєкторія відповідає всім заданим ПЕВО критеріям (завданням, задачам, потребам, вимогам, обмеженням) з урахуванням реальних ЗПРП вздовж зовнішньої трубки вкладених динамічних змін для досягнення мети з позиції кожного учасника гри [12].

Загальна математична задача. У диференціальних іграх [12,13] гравці обирають різні види стратегій: «прогноз і контрпрогноз», рівноважні по Нешу, гарантуючі. Останні для гарантування стратегій N гравцями (Рис.1) формуються згідно принципу мінімакса:

$$\min_{U_i} \max_{U_{N/i}} I_i \quad (1)$$

де I_i плата (оцінка якості дії) i -го гравця

$\forall i = \overline{1, N}$ у вигляді функціоналів

$$I_i = \int_{t_0}^{t_k} F_i(x, y, u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_N) dt + H_i[x(t_k), y(t_k)] \quad (2)$$

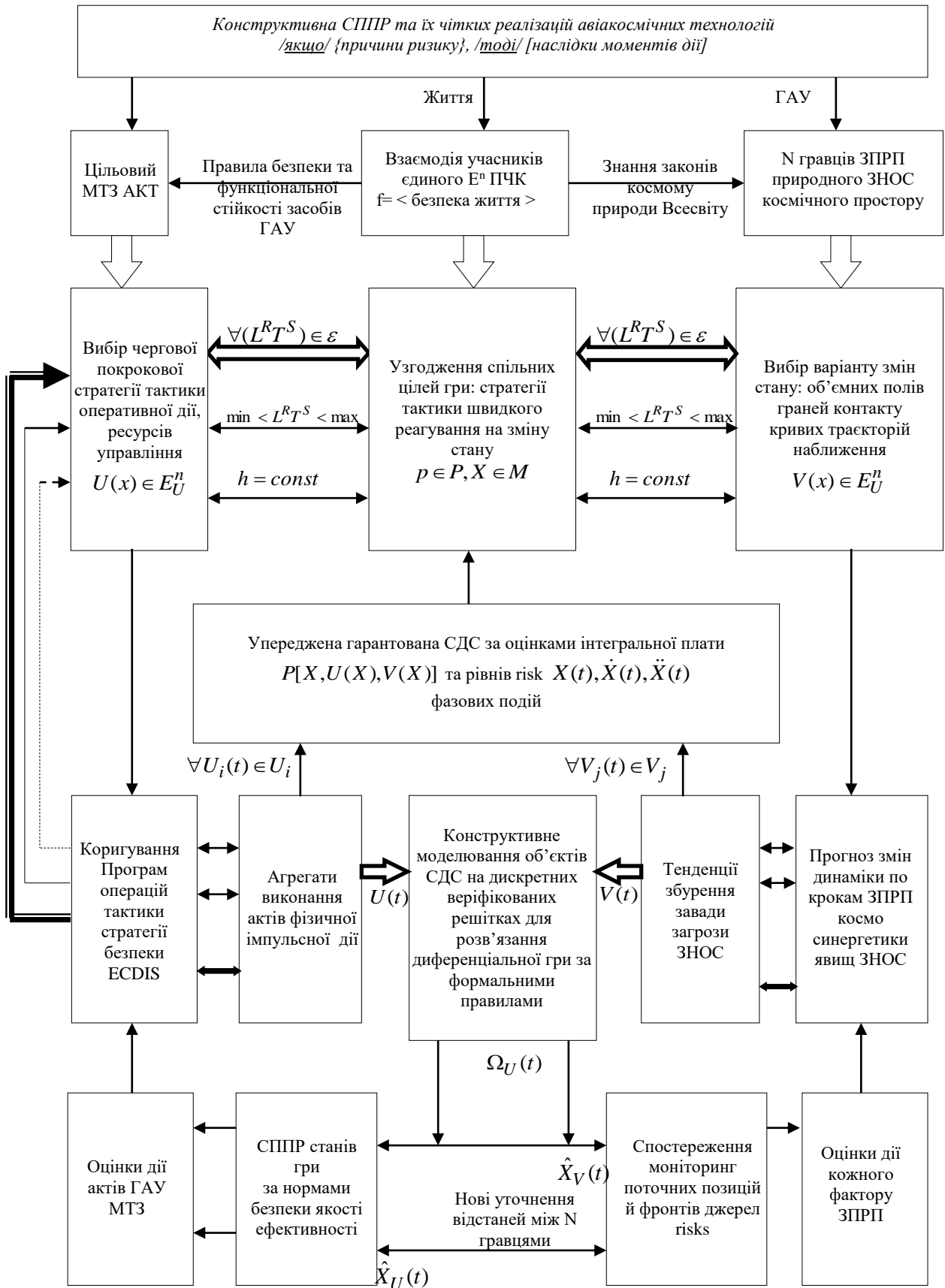


Рис. 1. Розподіл функцій диференціально-ігрової задачної системи між складовими типовими тривіальними задачами з формалізованими й верифікованими моделями адекватними головним об'єктам СДС під час руху об'єктів АКТ.

F_i задана функція оцінки якості перехідного процесу при змінах гри; H_i функція кінцевого стану, яка характеризує оцінку якості досягнення термінальної множини стану i -го гравця;

$u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_N$ відповідно управління (акти дії чи реалізації обраної конкретної стратегії) першого, другого та всіх інших включаючи N -го останнього гравця;

U_N/i - сукупність керуючих дій одночасно усіх $(N-1)$ крім i -го гравців.

При будь-якому реальному поведженні інших гравців i -й гравець може собі гарантувати лише результат обґрунтований у формі (1), (2). Крім того практично на акти дії гравців, тобто на їх можливі керуючі дії звичайно, існують фактичні техніко-технологічні обмеження

$$\begin{aligned} |u_1| \leq u_{1m}, |u_2| \leq u_{2m} \dots \\ \dots, |u_N| \leq u_{Nm}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $u_{1m}, u_{2m}, \dots, u_{Nm}$ - максимальні значення поточних керувань кожного з гравців відповідно до запасів власних TESIMFO ресурсів. Зміні стану об'єкта АКТ чи РКТ описується системою диференціальних рівнянь [11,15]. Для прикладу моделювання СДС у площині активної взаємодії двох гравців нелінійні диференціальні рівняння мають вигляд [4,5,13]:

$$dx/dt = \int_1(x, y, u, v) \quad (4)$$

$$dy/dt = \int_2(x, y, u, v) \quad (5)$$

де x, y - координати стану фізичного процесу СДС у обраній площині ОХУ з орієнтованими вісями; u, v відповідні керування (множина набрів) для ГАУ МТЗ та окрема множина впливів $(N-1)$ факторів ЗНОС; t - поточний час реальної взаємодії СДС на $t_0 \leq t \leq T$ інтервали моделювання від старту t_0 до досягнення у момент T термінального цільового стану.

Дана символізація наборів u, v підкреслює фізичну природну відмінність цільових актів управління u засобами ГАУ МТЗ, які адекватно реагують на всі v впливи багатьох (2) гетерогенних факторів ЗНОС. Природні фактори навпаки знижують ефективність роботи ГАУ завдяки додаткового витрачання ресурсів, що на борту МТЗ завжди обмежені. Тому вибір законів управління $u(z)$ відповідно впливів $v(z)$ за принципом мінімакса реалізується у класі нелінійних антагоністичних [13] ігор «людини» з «природою».

Таким чином застосування задачної диференціально-ігрової форми, принципу

мінімакса й розподілу ролей (функцій протидії) $u(z)$ і $v(z)$, дозволяє (рис.1) знайти керування.

Безпека життя тоді гарантована динамічним процесом ухилення від загроз, завад лише засобами ГАУ МТЗ АКТ у випадках нештатного найгіршого збігу обставин сполучення дії декількох гетерогенних збурень ЗНОС. Такі маневри протидіють на час прийняття рішення з невідомим законом $v(z)$ зміни у ситуативно локальній ЗППП. Базова основна задача диференціальної гри полягає у визначенні трьох взаємопов'язаних складових: умовно оптимальних згідно заданих критеріїв стратегій (кроків керування чи актів дії) гравців; фазових траєкторій покрової взаємодії; ціни (плати, вирашів чи втрат) гри для кожного ключового (першого) гравця.

Базова структуризація компонент задачної системи. Відомі методи моделювання в диференціально-ігровій постановці вимагають значних витрат обчислювальних ресурсів СППР застосованих ПАК [13,14]. Це обумовлено наслідком необхідності одночасно здійснити синтез оптимальної багатозначної СДС. Повна система організації балістико-навігаційного забезпечення управління [11,15] та реалізації взаємозалежностей охоплює складні компоненти: поле можливих траєкторних рухів у ПЧК; варіації й ситуативно-випадкові композиції прояву впливів незалежних гетерогенних факторів ЗНОС; залежність оцінок для прийняття рішення кожним з гравців у залежності від інтегрованої плати-ціни за дискретний вибір конкретного шляху; системи управління базами структурованих даних та бібліотекою підпрограм розв'язку ТТЗ; спеціальною диспетчерською системою організації функціонування цілісного ПАК.

Запобігання відомих труднощів у рішенні даної задачі запропоновано реалізувати шляхом чіткої структуризації застосування компонент ПАК [3] по етапам:

- підготовчий з активною участю інтелектуального агента ПЕВО або особи, що приймає суттєві рішення для формування формалізованих структурних моделей й відповідних підпрограм розв'язку означених ТТЗ;
- налагодження й верифікація базових й оперативних моделей для кожної ТТЗ;
- оцінювання ефективності, якості розрахунків всіх необхідних критеріїв, ціни, ваги, плати по кожній компоненті задачної системи, що моделюємо [11,15];
- виконавчий, що реалізує отримані рішення для здійснення плану і алгоритми розв'язання ТТЗ по вказаним моделям;
- інтегруючий комплекс синтезу умов досягнення розв'язків по крокам всіх гравців;
- діагностуючий та контрольний для оперативного виявлення колізій, протиріччя, неузгодженості результатів й перетворень;
- заключний для візуалізації, збереження й

накопичення результатів рішення аналогічних диференціально-ігрових задач [7-18].

Базовий автомат обчислювач потрібен для знаходження найкоротшого шляху між початковим (start begin) і термінальним (finale end) цільовими станами задачного ПЧК.

Фазовий простір, який моделює стани реальних процесів СДС, відображаємо у вигляді покриття решіткою [4, 5, 13] заданої конфігурації: трикутного, прямокутного (квадратного), n -кутного.

Задачний простір в площині (XOY) з заданою орієнтацією осей \vec{ox} та \vec{oy} для прикладу (рис.2) накріємо (розмітимо) прямокутною решіткою з діагоналями. Це дозволяє застосувати методи теорії графів $G(B, Q)$, B - вершини вузли решітки, Q - множина ребер, гілок, що з'єднують сусідні вершини по горизонталі, вертикалі, діагоналі.

Стандартні рівняння горизонтальних, вертикальних, діагональних ребер графа з прямокутною решіткою [4, 5, 13] у вершині (x_i, y_i) стану позиції наступні:

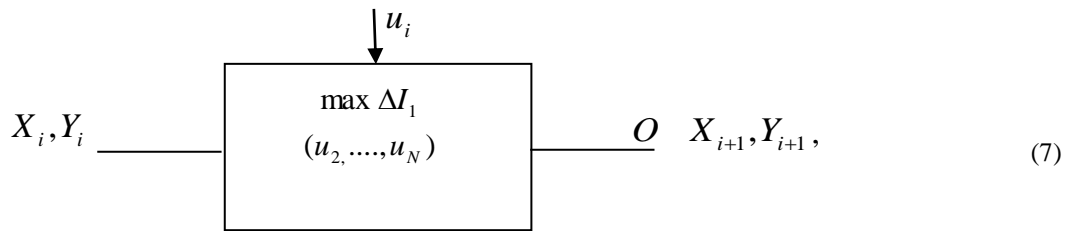
$$x = V_{ar}, Y = A_i; x = B_i, y = V_{ar}; y = ax + \beta_k \quad (6)$$

де A_i, B_i, a, β_k – константи для відповідної поточної позиції визначення найближчого сусіда відносно центра околу подій локальної ЗППП.

У реальному процесі функціонування СДС, модель у вигляді (4) і (5) визначає зміни станів за координатами (X, Y) .

Можливі на кроці переходу стану гри з однієї вершини графа у сусідню (іншу) або навпаки. Тому сусідні вершини графа уявно закріплюють два ребра відповідних спрямувань та можливо й з різними вагами.

Розрахунок кожної ваги (довжини, міри) ребер графа здійснюємо за умов максимізації збільшення плати першого гравця (ГАУМТЗ) за набором впливів всіх факторів ЗНОС (інших незалежних гравців природи у процесі переходу стану гри з означеної вершини графа в іншу, що з'єднується даним ребром. Стандартний крок моделювання переходу стану гри у ПЧК вздовж ребра пояснює схема:



де за умови максимізації збільшення плати першого гравця ΔI_1 та за набором керувань (актів дії) всіх інших $(N-1)$ гравців, два сусідніх стана (X_i, Y_i) та (X_{i+1}, Y_{i+1}) з'єднуються вказаним ребром, який має означену вагу (ціну, довжину). На кожному кроці дискретизації гри набір локальних керувань усіх гравців (крім першого ГАУ МТЗ АКТ), конкретизує відповідні чинники впливу факторів ЗНОС. Процес (крок у ПЧК) переходу стану гри з вершини (X_i, Y_i) до (X_{i+1}, Y_{i+1}) вздовж даного ребра, лише визначає вагу відповідно умові:

$$\max_{u_2, \dots, u_N} \Delta I_1(u_2, \dots, u_N) \quad (8)$$

де обов'язково враховані реальні обмеження (3) та особливості й специфіка розрахунків ваги горизонтальних, вертикальних, діагональних ребер графа-решітки. Розрахункові (6) формули отримуємо з виразів (2) після підстановки відповідної геометричної орієнтації параметрів (6), які A_i, B_i, a, β_k – константи заздалегідь відомі. За цих перетворень збільшення плати в процесі крокового переходу мають наступні рівняння:

$$\Delta I_{1,z} = \int_{B_l}^{B_{l+1}} G_x(x, A_i, u_2, \dots, u_N) dx, \quad (9)$$

$$\Delta I_{1,e} = \int_{A_m}^{A_{m+1}} G_y(y, B_i, u_2, \dots, u_N) dy, \quad (10)$$

$$\Delta I_{1,d} = \int_{B_m}^{B_{m+1}} G_x(x, \alpha, \beta_k, u_2, \dots, u_N) dx, \quad (11)$$

де індекси z, e, d вказують спрямування відповідно горизонтальних, вертикальних і діагональних ребер з відповідними діапазонами інтегрування по змінному параметру.

У всіх випадках коли локальне керування першого гравця не задовольняє обмеження (3) за наявних бортових ресурсів, це означає, що перехід стану гри уздовж такого конкретного ребра неможливий.

Сигналізація про це управління реалізується для горизонтальних, вертикальних, діагональних ребер графа функціями заборони:

$$\delta_z = \begin{cases} 1, & |u_{1z}| \leq u_{1\max}, \\ 0, & |u_{1z}| > u_{1\max}, \end{cases} \quad (12)$$

$$\delta_e = \begin{cases} 1, & |u_{1e}| \leq u_{1\max}, \\ 0, & |u_{1e}| > u_{1\max}, \end{cases} \quad (13)$$

$$\delta_d = \begin{cases} 1, & |u_{1d}| \leq u_{1m}, \\ 0, & |u_{1d}| > u_{1m}, \end{cases} \quad (14)$$

де $u_{1\max}$ – реальний запас ресурсу, що за розрахунком оцінки потреб може витрачатися стандартним чином на відповідну форму переходу.

Налагодження оперативних моделей. Базову основу математичної моделі складають рівняння (1÷14). Символьні перетворення дозволяють отримати явні формалізовані формули. Диференціальні рівняння динаміки у вигляді (4) та (5) дозволяють без втрати точності отримати частинну похідну:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{f_2(x, y, u, v)}{f_1(x, y, u, v)} \quad (15)$$

де всі змінні й координати стану фізичного процесу СДС зберігають ідентичність початкової задачі моделювання. Керування першого гравця з урахуванням (15) перетворимо у функцію залежності від координат стану x, y , похідної $\frac{dy}{dx}$ та керувань всіх інших учасників гри у вигляді:

$$u_1 = U(x, y, \frac{dy}{dx}, u_2, \dots, u_N) \quad (16)$$

Плату першого гравця згідно рівняння (2) представимо відповідно у двох формах:

$$I_x = \int_{X_0}^{X_k} G_x(x, y, u_1, u_2, \dots, u_N) dx + H(X_k, Y_k) \quad (17)$$

$$I_x = \int_{y_0}^{Y_k} G_y(x, y, u_1, u_2, \dots, u_N) dy + H(X_k, Y_k) \quad (18)$$

де нові розрахункові функції $G_x(\bullet) = F_1(\bullet)/f_1(x)$ та $G_y(\bullet) = F_1(\bullet)/f_2(x)$ враховують алгебраїчну розбіжність між функціями (2) оцінок якості моделювання перехідних процесів та іншими функціями динаміки реальних природних явищ СДС, які відображають формальні відношення (4) та (5) відповідно; $X_k = X(t_k)$ та $Y_k = Y(t_k)$ значення позиції на час t_k закінчення гри; $H(X_k, Y_k)$ – особа функція термінального кінцевого стану, коли гра досягає многовиду M [4,5,13].

Конкретизація під кожен задачу практики з отриманням розрахункових функцій $G_x(\bullet)$ та $G_y(\bullet)$ дозволяє їх застосовувати при структурній параметризації по формулам (9), (10), (11) для ребер пошукових проміжних станів фазової траєкторії. Коли починаємо наблизитись до кінцевого стану, тоді потрібно враховувати

$H(X_k, Y_k)$ з урахуванням (2), (17), (18).

Розрахункові формули отримуємо шляхом підстановки в них рівнянь (6) для реалізації умов особі вершини кінцевого стану гри. Верифікація і контроль формалізованих моделей, структур, алгоритмів ТТЗ завжди виконується на текстових задачах.

Приклад моделювання по графах безкоаліційної гри $N=3$ [5]. Динаміка зміни стану гри має фізичний сенс у вигляді рівняння:

$$dx/dt = -y; \quad dy/dt = 5u_1 + 2u_2 + u_3, \quad (19)$$

де на керування всіх гравців дано обмеження $|u_i| \leq 1, i=1,2,3$; стан гри початок ($X_0 = 4, Y_0 = 0$), кінець ($X_k = Y_k = 0$). Квадратна решітка з одиничним $h_x = h_y = 1$ кроком (Рис.2).

Виключаємо час з рівнянь (19), отримуємо (15) у вигляді:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{5u_1 + 2u_2 + u_3}{y} \quad (20)$$

Диференціальна гра на швидкодію має функціонали у вигляді:

$$I_i = \int_{t_0}^{t_k} dt; \quad I_x = -\int_{x_0}^{x_k} \frac{dx}{y}; \quad I_y = -\int_{y_0}^{y_k} \frac{dy}{5u_1 + 2u_2 + u_3}; \quad (21)$$

На двох наборах граничних керувань гравців маємо значення векторів:

$$\begin{aligned} [u_1 = 1, u_2 = -1, u_3 = -1] \text{ та} \\ [u_1 = -1, u_2 = 1, u_3 = 1] \end{aligned} \quad (22)$$

Тоді мінімальне значення функціонала (20) приймає вигляд:

$$dy/dx = 2/y \quad (23)$$

Принцип мінімакса для функціоналів (21) у даній задачі:

$$\begin{aligned} \min_{u_1} \max_{(u_2, u_3)} \int_{x_0}^{x_k} \frac{dx}{-y} \text{ та} \\ \min_{u_1} \max_{(u_2, u_3)} \int_{y_0}^{y_k} \frac{dy}{5u_1 + 2u_2 + u_3} \end{aligned} \quad (24)$$

Розрахунок ваги ребер графа відповідає умовам:

$$0 \leq \left| \frac{dy}{dx} \right| < \frac{h_y}{2h_x} \text{ або } 0 \leq \left| \frac{2}{y} \right| < \frac{1}{2} \text{ горизонтальні,} \quad (25)$$

$$\frac{h_y}{2h_x} \leq \left| \frac{dy}{dx} \right| = 2 \frac{h_y}{2h_x} \text{ або } \frac{1}{2} \leq \left| \frac{2}{y} \right| \leq 2 \text{ діагональні,} \quad (26)$$

$$\left| \frac{dy}{dx} \right| > 2 \frac{h_y}{2h_x} \text{ або } \left| \frac{2}{y} \right| > 2 \text{ вертикальні.} \quad (27)$$

Якщо умови (25) не виконуються, то горизонтальні будуть заборонені. На квадратній решітці (Рис. 2) тани ребра блокуються лише тонкі лінії. Діагональні ребра згідно (21) на кроці розраховуємо за даними [5]:

$$\Delta I_{km} = \ln \left| \frac{B_{m+1} + \beta_k}{B_m + \beta_k} \right| \text{ або } \Delta I_{km} = \ln \left| \frac{X_{i+1} + 1}{X_i + 1} \right| \quad (28)$$

де вага діагоналі $Y = x + 1$, $\forall x_i = 0, 1, 2, 3$; $x_{i+1} = 1, 2, 3, 4$.
Всі діагональні ребра з вершинами (Рис. 2) на осі абсцис а також ребра, що вище рівня $Y_i = 4$, будуть заборонені згідно (26). Для вертикальних ребер графа, всі що вище горизонталі заборона згідно (27). Робочі вертикальні ребра за умов наборів управління (22) всі мають вагу 0,5 та знаходяться між віссю абсцис $Y = 0$ й горизонталлю за умов (27). Дерево розв'язку задачі мінімальних шляхів від кореня ($x_0 = 4$, $y_0 = 0$) до кінця відображено на Рис.2 жирними орієнтованими векторами руху. Коло кожної раціональної вершини графа вказує час, що потрібен для гарантованого (безпечного за кількома критеріями) переміщення у просторі станів під дією управління першого гравця та максимальним "протидам" інших двох гравців. Контрольна для тестування задача (19) має точний аналітичний розв'язок:

$$\begin{cases} Y^2 = 4x & \text{при } 0 \leq x \leq 2 \\ Y = 16 - 4x, & \text{при } 2 \leq x \leq 4, T = \sum_{\Delta} t = \sqrt{8} \approx 2,83 \end{cases} \quad (29)$$

Порівняння аналітичного (29) та апроксимаційного (рис.2) розв'язків [5] наведено на рис.3, де точний розв'язок визначено пунктиром. Вдодж оптимального шляху визначені набори управлінь всіх гравців (рис.3). Вони співпадають з точними значеннями стратегій для кожного. Тестові задачі дозволяють вибирати масштаби та кроки дескретизації відповідно особливостям й специфіки конкретній диференціально-ігровій задачі. Моделювання на графах за допомогою адекватних моделей дозволяє швидко (завчасно) стримувати суттєві знання стосовно гарантованої якості прийняття рішень для реалізації стрибкоподібних (real time) маневрів за нелінійними законами ГАУ МТЗ АКТ. Візуалізовані графічні складові рішення чітко розподіляють зони нелінійного руху й звертають увагу на причини тенденцій зростання похибок, що поки належать заданому допуску.

Паралельні обчислювання [14] у задачах диференціальних ігр доцільні для засобів

реального часу ГАУ МТЗ АКТ, для яких поняття безпеки життя, гарантування, стійкості, точності, прогнозу, ефективності, й економічності взаємозалежні [4,5].

Запропонований метод структурної декомпозиції складної задачної системи диференціальної гри N гравців та моделювання гри на графах-решітках, що покривають повний фазовий простір станів у ПЧК, дозволяє отримувати рішення (Рис.1) на відомих ЕОМ, паралельних обчислювальних системах та гібридних комплексах з раціональним розподілом функцій учасників ПЕВО, наприклад, для управління космічними апаратами [15].

У аналогових моделях вага (8) ребер графа задається часом затримки між моментом приходу електричного сигналу на вхід моделі ребра та моментом його появи на її виході. Тривалість інтервалу часу проходження електричного сигналу між початковою і кінцевою вершинами графа буде визначатися саме конфігурацією найкоротшого шляху для пропорційного мінімаксного значенню плати (1) першого гравця.

У цифрових моделях з запам'ятовуваними багатоядерними пристроями за адресами, що задають значення наборів керувань гравців, існують ефективні методи розв'язання цієї ТТЗ. Бібліотека ПАК має апробовані [16] алгоритми, що додатково враховують різноманітні аспекти безпеки та інших критеріїв "найкоротшого" транспортного шляху. Гарантуюча стратегія першого гравця обґрунтовується покроковими наборами найгірших (за наслідками для першого) набору актів дії всіх інших гравців. Коли треба аналогічно з позицій будь-якого іншого активного гравця (наприклад хакера, інсайдера, агента протидії) можливо для СППР визначати гарантуючі стратегії таких гравців заздалегідь та упереджено ухилитись від них. Багато задач практики [17,18] дозволяють за принципом мінімакса обирати набір гарантуючих керувань у запропонований нами спосіб (рис.1) одночасно на N апробованих, спеціалізованих, адаптованих графах. Саме це доцільно для додаткового контролю точності апроксимації при побудові графів-решіток різних ЗПРП та для стратегічних, тактичних й оперативних задач, сукупність яких глобально оптимізує витрати TESIMFO ресурсів на реалізацію конкретних АКТ-РКТ у ЗНОС.

Накопичення знань безаварійних рухів МТЗ та різноманітних космічних апаратів стосовно процедур прогнозування їх гарантованих траєкторій у штатних та екстремальних режимах функціонування є важливою діяльністю вітчизняних ПЕВО космічної галузі включаючи Національний центр управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України.

Висновки. Якісне гарантування безпечного руху космічних апаратів у нестационарному аерокосмічному середовищі запропоновано здійснювати за парадигмою диференціальної гри.

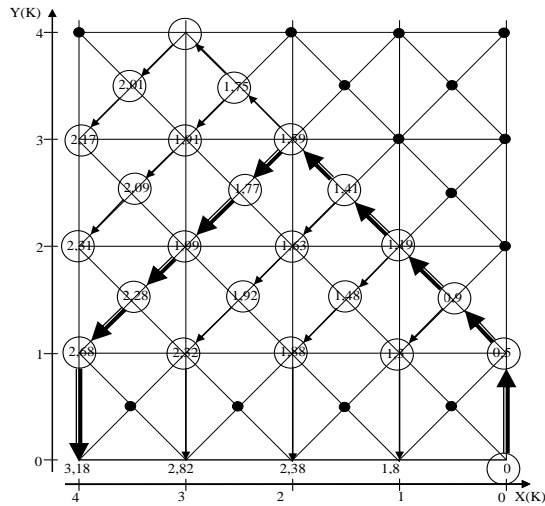


Рис.2. Візуалізація апроксимаційного графа – решітки з деревом мінімаксних розв’язків можливих орієнтовних шляхів та околom заборони сусідніх вершин й ребер без оцінок значення досягнення умов тестової задачі: $N = 3$; $\frac{dx(t)}{dt} = -y$; $\frac{dy(t)}{dt} = 5U_1 + 2U_2 + U_3$, керування: $U_{m1} = \pm 1$; $U_{m2} = \pm 1$; $U_{m3} = \pm 1$.

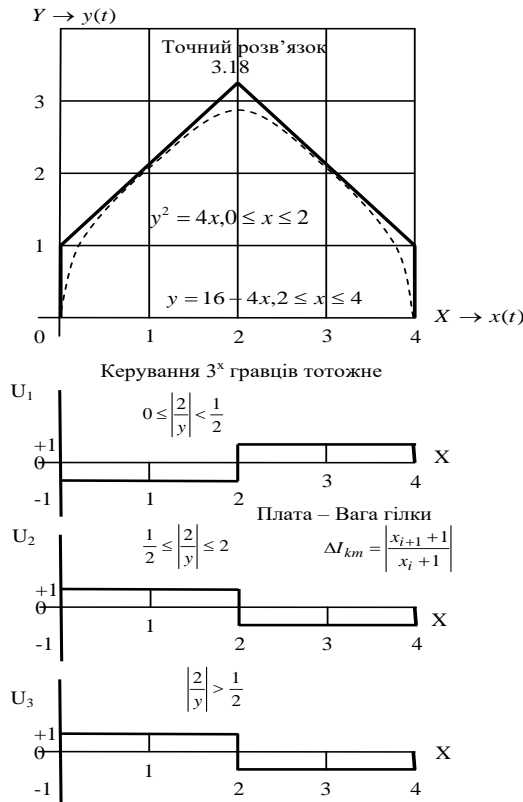


Рис.3. Графічне порівняння аналітичних (пунктир) та апроксимаційних (жирні) розв’язків траєкторій й стратегічне точних керувань 3х гравців у тестовій задачі: $\frac{dy(t)}{dx(t)} = \frac{(5U_1 + 2U_2 + U_3)}{y} = \frac{2}{y}$; $\Delta I_{im} = \frac{1}{y_i}$

Отримані результати дослідження дозволяють сформулювати наступні висновки.

1. Кожний етап чи крок структуризації складних динамічних систем та практичної задачної системи спрямований на формування типових формалізмів з конструктивних ефективних моделей. Вони забезпечують застосування паралельних алгоритмів та обчислювальних структур для гарантовано

адаптивного управління за вимогами реального часу реалізації авіаційно-космічних та ракетно-космічних технологій. СДС та ЗНОС, а також КСЦМ як засоби взаємодії між ними, моделюємо паралельними базисними макромоделями, які уточнюються деталізованими мікромоделями з типових елементів.

2. Структурне комплексне моделювання СДС за парадигмою диференціально-ігрових задач потребує

пріоритетного визначення гравців з протилежними цілями (загрозливий напад – безпечний гарантований ухід), які дозволяють покровоко й почерзі обирати власні керування (акти дії, стратегії) згідно принципу мінімакса. Витрати TESIMFO ресурсів ПЕВО мінімізуємо з одночасним врахуванням максимальних значень реально можливих форм впливу протилежної (фактори ЗНОС) сторони для кожної конкретної природної ситуації.

3. Сутність кожної моделі граф-решітки полягає у: повному покритті зони моделювання ПЧК; дискретизації за критеріями точності й обчислювальної ефективності кожної локальної частки цього простору; означенні особливостей формування ваги ребер (гілок переходу з попереднього у наступний стан); спеціалізації розміток граф-решітки, включаючи випадки відключення (блокування) гілок внаслідок отримання сигналів від функцій заборони на реалізацію даного акту дії.

4. Відповідно до кожного класу

диференціальної гри особливо для нелінійних антагоністичних ігор потрібно зробити верифікацію формул розрахунку ваги (горизонтальних, вертикальних, діагональних) ребер графа-решітки та логічних функцій заборони відповідно до задачних вимог ПЕВО. Нелінійну диференціальну гру треба моделювати не менш ніж два рази з оцінюванням мінімаксного і максимінного значень функціоналів сутності означеної формальної гри.

5. Паралельно моделювання диференціальних ігор N - гравців (реально обмеженої конструктивної кількості) на всіх N графах особистих та спеціалізованих решітках дозволяє використовувати один конструктивно базовий обчислювач для отримання на кожній решітці найкоротшого шляху за час ситуативно послідовного (почергового) формування міток конфігурації траєкторії гри, що шукаємо за всіма інтегрованими критеріями.

Список літератури:

1. Баранов Г.Л. Активне визначення безпечно-гарантованої траєкторії шляхом структурного моделювання диференціально-ігрових задач в системах навігації і управління об'єктів водного транспорту./ Г.Л. Баранов, В.І. Тарасюк, С.П. Васько // Системи управління, навігації і зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ, 2011. – Вип.2 (18). – С.2-7.
2. Баранов Г. Л. Формування основ метризації ресурсних знань поліергетичних технологій / Г.Л. Баранов, О.М. Прохоренко // Розбудова економічної освіти та формування основ фінансової грамотності учнівської молоді – основа розвитку громадського суспільства та становлення економіки знань: матеріали МН-ПК, 29-30 вересня 2017 рік м. Київ – к.: Ін-т обдарованої дитини НАПН України, 2017. – С. 26-32.
3. Баранов Г.Л. Структурное моделирование сложных динамических систем / Г. Л. Баранов, А.В.Макаров. – К.: Наук.Думка, 1986. – 272 с.
4. Баранов Г.Л. Структурное моделирование динамических и дифференциально игровых систем/ Г.Л. Баранов, В.Л. Баранов/ Препринт – 485, Киев, АН УССР. Институт электродинамики. – К.: 1987. – 55 с.
5. Баранов Г.Л. Структурное моделирование дифференциально- игровых систем и объектов/ Г.Л. Баранов, В.Л. Баранов/ Препринт-600, Киев, АН УССР. Институт электродинамики. – К.: 1989. – 48 с.
6. Кабінет Міністрів України “Про схвалення концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 р.” Від 30 березня 2011 р., №238/р.
7. Даламбер Ж. Динамика/ Ж. Даламбер, – М.: Госиздат, 1950. – 360 с.
8. Лангранж Ж. Аналитическая механика/ Ж. Лангранж. – Изд 2-е.- М.: 1950. – Т1. – 640 с.
9. Эйлер Л. Метод нахождения кривых линий обладающих свойствами максимума либо минимума и решение изопериметрической задачи/ Л. Эйлер. – М. Гостехиздат. 1934. – 540 с.
10. Павловский М.А. Теоретична механіка/М.А.Павловський. – К.: Техніка. 2002. – 512 с.
11. Ракушев М.Ю. Прогнозування руху космічних апаратів на основі диференціально-теїлорівських перетворень: Монографія / М.Ю. Ракушев. – Ж: Видавець О.О.Євенок. 2015. – 324 с.
12. Айзекс Р. Дифференциальные игры / Р.Айзекс. – М.: Мир.1967.- 480 с.
13. Васильев В.В. Моделирование задач оптимизации и дифференциальных игр / В.В. Васильев, В.Л. Баранов. – К.: Наукова думка. 1989. – 286 с.
14. Нагорний Л.Я. Розпаралелювання рішень систем рівнянь великої розмірності / Л.Я. Нагорний, І.А. Жуков/ Вісник КМУЦА. – К.: КМУЦА. – 1998. – №1. – С.236-240.
15. Організація балістико-навігаційного забезпечення управління космічними апаратами: Підручник / О.Б. Захаров, В.О. Гуменюк, Р.М. Залужений та ін.; Під заг.ред. М.С. Сівова/ К.: НАОУ, – 2007. – 508 с.
16. Прокудін Г.С. Моделі і методи оптимізації перевезень у транспортних системах [монографія] / Г.С. Прокудін. – К.: НТУ, 2006. – 224 с.
17. Баранов Г.Л. Комплексна інтеграція інформаційних процесів інтелектуальних транспортних систем для якісного гарантування безпечної руху у нестационарному середовищі/ Г.Л. Баранов, І.В.Тихонов, Р.А. Габрук, В.Р. Косенко, О.М. Прохоренко/ Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті. НТЖНТУ. К.:НТУ. 2015. Вип. 3. – С. 85-95.
18. Система диспетчерського управління рухомими об'єктами з використанням сигналів глобальної супутникової системи радіонавігації/ Г.Л. Баранов, Л.С.Беляєвський, М.Ф. Дмитриченко, М.М. Дмитрієв, П.Р. Левковець, Є.О. Топольськов та ін./ ПАТЕНТ на винахід UA№75709. С.2. МПК (2006), GOIS 5/14

References:

1. Baranov, G.L. Actively viznachennya carelessly-guaranteed traektorii with the hat of the structural modeling of differentiating and solving tasks in the systems for navigating and managing water transport. / G.L. Baranov, V.I. Tarasyuk, S.P. Vasko // Sistemi manages, navigating and zv'yazku. – K.: ЦНДІ НУ, 2011. – Вип.2(18). – С.2-7.
2. Baranov, G. L. The form of the foundations of metrizacies of resources known to poliergetic technolo- gies / G.L. Baranov, O.M.

Прохоренко // *Rozbudova ekonomichnoi osvity ta formavannia basics finansovoi hramotnosti innivskoi molodi - the basis of the development of the huge estate and the economy of the country: Materiali MN-PK, 29-30 vesnya 2017 rik m. Kiev - K. : In-t obdarovanoi dytyny NAPN Ukrainy, 2017 - P. 26-32.*

3. Baranov G.L. *Structural modeling of complex dynamical systems* / G.L. Baranov, A.V. Makarov. - K.: Nauk.Dumka, 1986. - 272 p.
4. Baranov G.L. *Structural modeling of dynamic and differentially gaming systems* / G.L. Baranov, V.L. Baranov / Preprint - 485, Kiev, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Institute of Electrodynamics. - K.: 1987. - 55 p.
5. Baranov G.L. *Structural modeling of differential-game systems and objects* / G.L. Baranov, V.L. Baranov / Preprint-600, Kiev, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Institute of Electrodynamics. - K.: 1989. - 48 pp.
6. Кабінет Міністрів України "About grasp of the concept of realizing the state of the art in the sphere of cosmic diodes for the period up to 2032." On the 30th of the 2011 birch 2011, No. 238 / r.
7. D'Alembert J. *Dynamics* / J. d'Alembert, M.: State Publishing House, 1950. - 360 p.
8. Langrange, J. *Analytical Mechanics*, J. Langrange, Second ed., M.: - 1950. - T1. - 640 p.
9. E. Jailler. *A method for finding curve curves possessing the properties of a maximum or a minimum and solving the isoperimetric problem* / L. Euler, M. Gostekhizdat. 1934. - 540 p.
10. MA Pavlovsky *Theoretical mechanics* / MA Pavlovsky. - K.: Техніка. 2002 - 512 p.
11. Rakushev M.Yu. *Prediction of the Rukh Cosmic Apparations on the Basis of Differential-Taylorian Movements: Monograph* / M.Yu. Rakushev. - Z: Vidavets OO.venenok. - 324 p.
12. Isaacs R. *Differential games* / R.Aizseks. - M.: Mir. 1967. - 480 p.
13. Vasilyev V.V. *Modeling optimization problems and differential games.* / V.V. Vasiliev, V.L. Baranov. - K.: Naukova Dumka. 1989. - 286 p.
14. Nagorniy L.Ya. *Rozparaleliuvannia rishen system rivnian velykoi rozmirnosti* / L.Ya. Nagorniy, I.A. Zhukov / Visnyk KMUTsA. - K.: KMUTsA. - 1998. - №1. - P. 236-240.
15. *Organizing a ballistic-navigational management of space vehicles: Pidruchnik* / O.B. Zakharov, V.O. Gumenyuk, R.M. Zaluzhenii ta ne; ; Під заг.ред. M.S. Sivova / K.: NAOU, - 2007. - 508 p.
16. Prokudin G.S. *Models and methods of optimization of transport in transport systems [monograph* / G.S. Prokudin]. Prokudin - K.: NTU, 2006. - 224 p.
17. Baranov, G.L. *Integrated integration of information processing in telecommunication transport systems for the safe guarantee of a non-smoking rush in a non-stationary medium* / G.L. Baranov, I.V. Tikhonov, R.A. Gabrouk, V.R. Kosenko, O.M. Prokhorenko / *Informational processes, technology and transport systems. NTZHNTU.* - K.: NTU. 2015. Vip. 3. - P. 85-95.
18. *The system of dispatching control of the objects by means of the signals to the global satellite system of radiosavigation* / G.L. Baranov, L. S. Belyaevsky, M.F. Dmitrichenko, M.M. Dmitriev, P.R. Levkovets, C.O. Topols'kov ta in. / *PATENT on the wines UA №75709. C.2. IPC (2006), GOIS 5/14*

КОНСТРУКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ С ПАРАДИГМОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ИГРЫ

Баранов Г.Л., Прохоренко А.Н.

Разработана методика комплексного структурного моделирования сложной динамической системы гарантированно адаптивного управления объектов авиационно-космических технологий в условиях риска и неопределенности факторов воздействия природного внешней среды. Приведенно структурно функциональное обеспечения компьютерных средств для решения дифференциально - игровых задач N-игроков. Определены условия безопасно-гарантированных траекторий движения мобильных объектов с учетом одновременно совместного нелинейного действия N-игроков.

Ключевые слова: безопасная траектория движения МТЗ, дифференциально-игровая аппроксимация, без коалиционные решения, изменения ситуаций, поочередное управления, ресурсы АКТ.

CONSTRUCTIVE MODELING OF OBJECTS OF AVIATION-SPACE TECHNOLOGY WITH PARADIGM OF A DIFFERENTIAL GAME

G. L. Baranov, O.M. Prokhorenko

The complex dynamical system structural modeling methodology was developed for aviation-space technology in the risk conditions and natural environment under uncertain influence factors of environment. The structurally functional computer means provided for N-players differential-game solving problems is given. The mobile object movements' safe-guaranteed trajectories conditions are determined, taking into account simultaneously the common non-linear action of N-players.

Keywords: safe trajectory of MTZ movement, differential-game approximation, no coalition decisions, situation change, alternate management, ACT resources.