

УДК 629.78

¹В.І. Чепіженко, к.т.н., с.н.с.²В.В. Павлов, д.т.н., проф.³В.П. Харченко, д.т.н., проф.

ЕНЕРГЕТИКО-ПОТЕНЦІАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ У СЕРЕДОВИЩІ CNS/ATM

¹⁻³Національний авіаційний університет¹E-mail: chiv@nau.edu.ua³E-mail: kharch@nau.edu.ua²Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України

E-mail: vpavlov@nau.edu.ua

Установлено аксіоматику енергетико-потенціального управління повітряним рухом у середовищі CNS/ATM. Запропоновано багатопшарову структуру модельного зображення аеронавігаційного середовища, що дозволяє істотно знизити складність завдань розв'язання конфліктів між учасниками повітряного руху, а також спростити реалізацію концепції Free Flight з підвищеним рівнем безпеки.

Ключові слова: концепція Free Flight, модель, середовище CNS/ATM, складна система, управління.

Постановка проблеми

Фундаментальною системоутворюючою властивістю сучасної системи організації повітряного руху є солідарність усіх його учасників у досягненні максимальної безпеки. Ця властивість лежить в основі правил формування, існування, функціонування аеронавігаційного середовища і є основою для синтезу управління поведінкою всіх її елементів.

Необхідність найшвидшого вирішення проблеми безпеки повітряного руху впливає з Глобального аеронавігаційного плану CNS/ATM ICAO [1; 2].

Забезпечення безпеки сьогодні зумовлено сучасними тенденціями розвитку авіації.

Перша тенденція розвитку авіації пов'язана з таким:

- інтенсифікацією повітряного руху;
- розширенням діапазонів експлуатації повітряних суден (ПС) і кола завдань, розв'язуваних авіацією в цих умовах.

За прогнозами, наведеними в роботах [3–5], інтенсивність повітряного руху щорічно зростає по експоненті і становить 5–6 %.

У роботах [6; 7] послідовне розв'язання конфліктів при підвищенні щільності повітряного руху може призвести до виникнення нових конфліктів із ПС.

Отже, різко збільшується небезпека циклічного виникнення конфліктів, що може призвести до неконтрольованих катастрофічних ситуацій.

Крім того, аналіз повітряного руху в найбільш завантажених районах Європи свідчить про збільшення кількості конфліктів, до складу яких входять більш ніж два літаки. А саме:

- збільшення топологічної складності конфліктів
- посилення вимог до швидкості та функціональності алгоритмів їхнього розв'язання в рамках систем організації повітряного руху.

Друга тенденція розвитку авіації визначається принципово новими вимогами та можливостями, які створює Всесвітня транспортна система [1; 2].

Нові організаційні та комп'ютерні технології глобального управління ПС декларують гнучке, скоординоване, а не регламентоване використання повітряного простору з урахуванням усіх користувачів у середовищі CNS/ATM.

Перехід від централізованої командної системи управління повітряним рухом до розподіленої системи дозволяє учасникам

повітряного руху вибирати маршрути польотів виходячи з критеріїв ефективності та економічності. Тому формування середовища CNS/ATM у першу чергу пов'язане з необхідністю забезпечення реалізації концепції Free Flight [8].

Третя тенденція розвитку авіації полягає в інтенсифікації розроблення і використання авіаційних робототехнічних систем, що функціонують без участі пілота [9–11]:

- UAV (Unmanned Air Vehicle);
- UAS (Unmanned Aircraft Systems).

Перспективним напрямом розвитку повітряного руху є формування аеронавігаційного простору нового типу, який за умови підтримки регламентованого рівня безпеки всіх його учасників володіє принципово новими властивостями:

- віртуальністю;
- розподіленістю;
- великої розмірністю;
- керованістю;
- спостереженням;
- автономністю;
- робототехнічною експансією.

Аналіз досліджень і публікацій

В основі безпеки повітряного руху лежать методи й алгоритми виявлення та розв'язання конфліктних ситуацій.

Дослідження, спрямовані на розробку й удосконалення методів виявлення та розв'язання конфліктів в аеронавігаційному середовищі, розпочато ще в другій половині минулого сторіччя. Їх всебічний літературний огляд і систематизація проведено в роботах [12; 13].

У роботі [12] автори провели класифікацію методів розв'язання конфліктів в аеронавігаційному середовищі і виділили серед них три основні групи:

- наказові;
- оптимізаційні;
- силового поля.

Наказові методи (методи твердих схем маневрів) ґрунтуються на завчасному формуванні попередження про можливий конфлікт (можливості зіткнення з землею або

іншими ПС). Ці методи мають низьку ефективність через те, що не можуть забезпечувати розв'язання конфлікту в реальному часі.

Оптимізаційні методи засновані на взаємодії кінематичної моделі об'єкта управління і функцій вартості, які включають параметри безпечного розв'язання конфлікту [13]:

- безпечну дистанцію між конфліктуючими;
- відхилення від початкової траєкторії;
- ступінь відхилення кінематичних параметрів руху від номінальних.

Однак уведення у функцію вартості великої кількості параметрів породжує проблеми, пов'язані зі значним збільшенням розмірності моделі керованого процесу.

Складність керованого процесу оцінюється за складністю адекватного йому керуючого процесу [14; 15]:

$$N \geq n + \frac{n(n+1)}{2}, \quad (1)$$

де n – розмірність системи керованого процесу.

Аналіз формули (1) показує, що зростання складності математичної моделі системи призводить до поліноміального зростання складності системи управління, що породжує ефект «прокляття розмірності».

У методі силового поля кожний літак розглядається як заряджена частинка.

Розв'язання конфлікту шукається на основі розв'язку рівнянь моделі силових полів.

Силові поля задаються кожним із дослідників евристично виходячи з принципу здорового розуму [16; 17].

Перевагою цього методу є відносна простота рівнянь моделі. Однак дотепер не усунути недоліки цього методу, які полягають у складності реалізації отриманих траєкторій маневру («топання» на місці, «звалювання в штопор» під час обходу перешкод і т.д.).

У роботах [12; 13] в окрему групу виділені імовірнісно-статистичні методи розв'язання конфліктів. Недоліки цього підходу відзначаються багатьма авторами.

У роботі [18] показано, що при розробці ймовірнісних моделей гіпотезу про випадкову природу неконтрольованих збурень не може бути прийнята:

1) якщо априорі з загальних міркувань виходить, що неконтрольовані процеси не мають випадкової природи, як, наприклад, у випадку ситуації втікання-переслідування;

2) якщо обсяг експериментальних даних щодо вивчення властивостей невизначених процесів недостатній для одержання стійких статистичних характеристик цих процесів, навіть якщо ці процеси і випадкові за своєю природою.

Більшість існуючих методів розв'язання конфліктних ситуацій в аеронавігаційному середовищі мають ряд істотних недоліків:

– евристичний підхід до формування моделей середовища та конфліктних ситуацій має характер волюнтаризму;

– у ході вирішення завдань глобального розв'язання конфліктів (кількість учасників конфлікту більше двох) алгоритми мають велику обчислювальну складність;

– використання ймовірнісного математичного апарату не дає 100 % гарантії розв'язання конфлікту;

– більшість синтезованих алгоритмів забезпечують вирішення приватних фрагментарних завдань розв'язання конфліктів;

– використання існуючих методів є неефективним для реалізації концепції Free Flight в умовах складної топології аеронавігаційного простору.

Виділення невирішених частин загальної проблеми

На сьогодні виникла проблемна ситуація, яка полягає в протиріччі між потребою в створенні єдиної методології формування аеронавігаційного середовища і управління повітряним рухом з урахуванням сучасних тенденцій розвитку авіації та недостатніми можливостями існуючого науково-методичного апарату, зокрема, недосконалістю науково обґрунтованих методів і методик такого управління.

Очевидним шляхом вирішення зазначеної проблеми є:

– дослідження аеронавігаційного середовища з позицій системного підходу;

– виявлення його об'єктивно існуючих властивостей і закономірностей;

– розробка відповідного науково-методичного апарату.

Мета роботи – обґрунтування й аксіоматичний опис цілісної системної методології організації та управління аеронавігаційною системою типу CNS/ATM, що гарантовано забезпечує:

– реалізацію концепції Free Flight з підвищеним рівнем безпеки;

– економію індивідуальних ресурсів ПС у глобальній аеронавігаційній системі;

– економію корпоративних ресурсів систем управління;

– економію корпоративних ресурсів системи обслуговування польотів;

– урахування еволюційних процесів зміни функціонального стану компонентів системи CNS/ATM.

Комплексне вирішення проблеми не тільки принципово важливо, але в теоретичному плані відноситься до класу завдань підвищеної складності.

Виклад основного матеріалу дослідження

Виходячи з високої відповідальності розв'язуваної прикладної проблеми запропоновано максимально виключити використання евристик, волюнтаризму і суб'єктивізму, методу проб і помилок, а використовувати підхід гарантованого результату за умови [18–21]:

– середовище CNS/ATM – це велика ергатична (людино-машинна) система;

– Free Flight і самомаршрутизація – це основні властивості ергатичної CNS/ATM системи;

– закономірність, цілісність і синергизм – основні властивості CNS/ATM системи, як FANS – системи (Future Air Navigation Systems);

– компоненти авіатранспортної системи мають природну властивість реальних систем – еволюцію і деградацію функціонального стану;

– цілісність і нерозривність синергетичних динамічних процесів управління авіатранспортним соціумом є його системними інваріантами.

Для формалізації модельного подання середовища CNS/ATM у рамках природничо-наукового системного підходу введемо поняття двох світів:

- ViAN-світу (Virtual Air-Navigation);
- PhAN-світу (Physical Air-Navigation).

В основі формування ViAN-світу лежить природничо-науковий підхід, що був сформульований Гельмгольцем, який вважав, що кінцеве завдання фізичної науки полягає в тому, щоб звести фізичні явища до незмінних сил притягання або відштовхування, величина яких цілком залежить від відстані. Можливістю вирішення цього завдання є умова повного розуміння природи [22].

Сили притягання й відштовхування утворюють гравітаційні поля, які в рамках енергетико-потенціального управління є фундаментом реалізації синергетичного принципу управління – єдності можливого і бажаного.

ViAN-світ володіє складною структурою, яка складається з трьох основних підпросторів:

- віртуального особистого підпростору бажаних поведінок об'єктів ViAN-світу (рис. 1);
- віртуального підпростору актуалізованих переваг об'єктів ViAN-світу (рис. 2);
- віртуального загального підпростору ViAN-світу (рис. 3).

Для опису цих просторів введемо аксіоматику ViAN-світу.

Аксіома 1. ViAN-світ із позицій класичної механіки являє собою повну замкнену динамічну систему гравітувальних об'єктів.

Аксіома 2. Кожний гравітувальний об'єкт, занурений в ViAN-світ, являє собою матеріальну точку з власною масою m і є носієм повного набору гравітаційних сил.

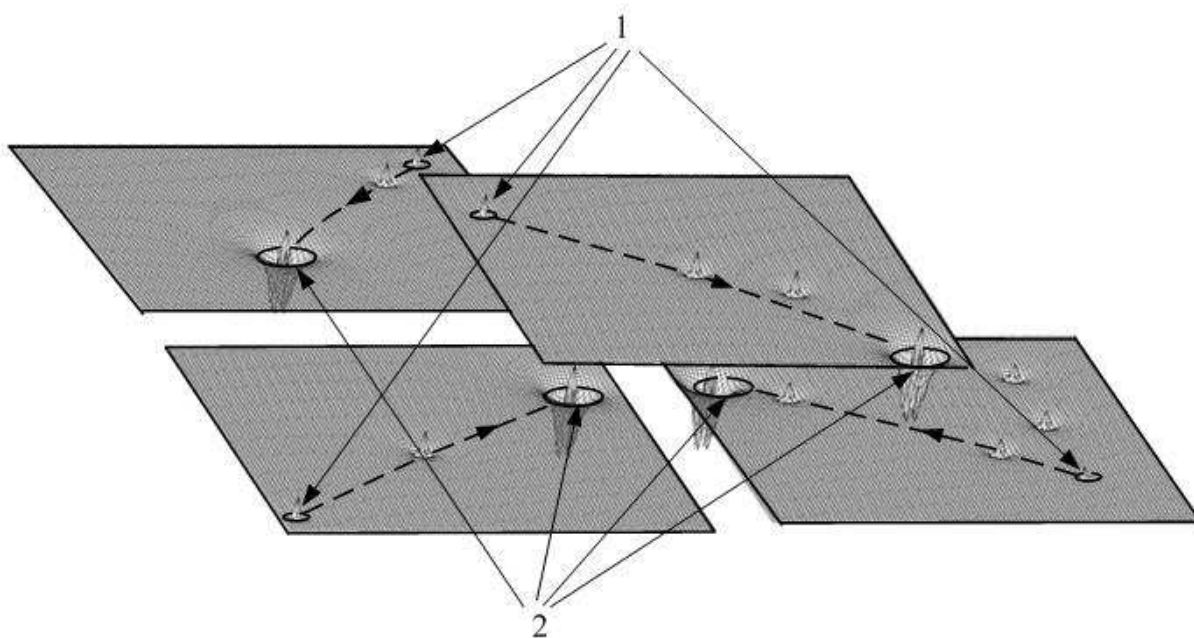


Рис. 1. Віртуальний особистий підпростор ViAN-світу:
1 – динамічні гравітувальні об'єкти ViAN-світу;
2 – індивідуальні цільові гравітувальні об'єкти

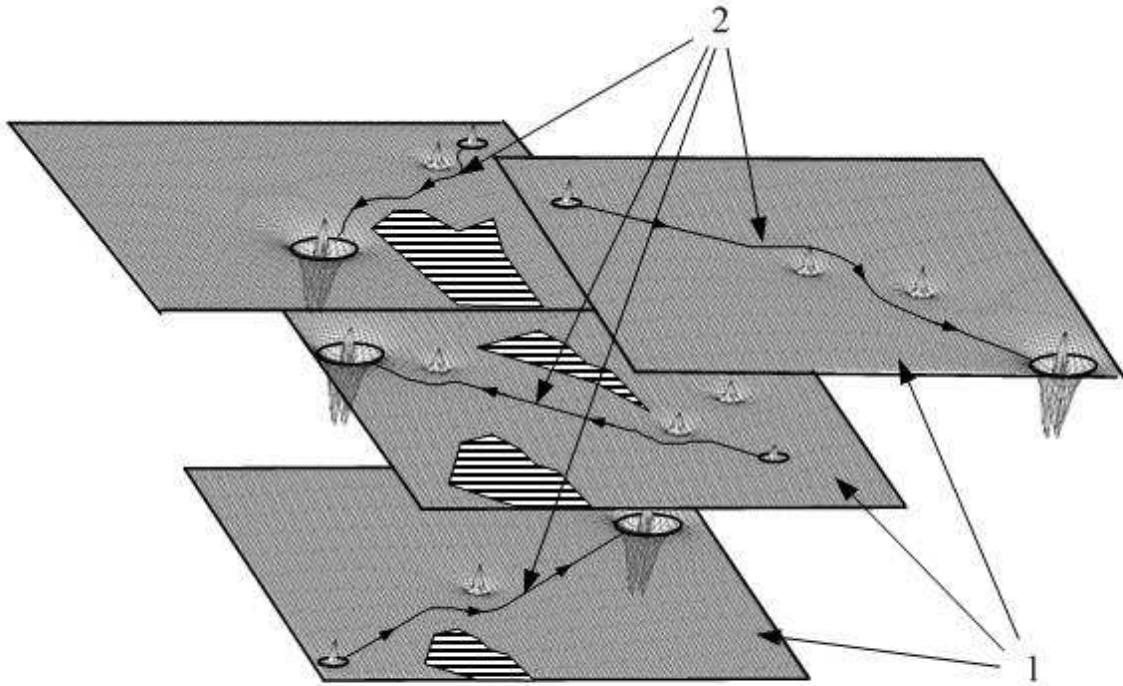


Рис. 2. Віртуальний підпростір актуалізованих поведінок об'єктів ViAN-світу:
 1 – підпростори актуалізованих поведінок кожного гравітувального об'єкта;
 2 – актуалізовані траєкторії руху гравітувальних об'єктів

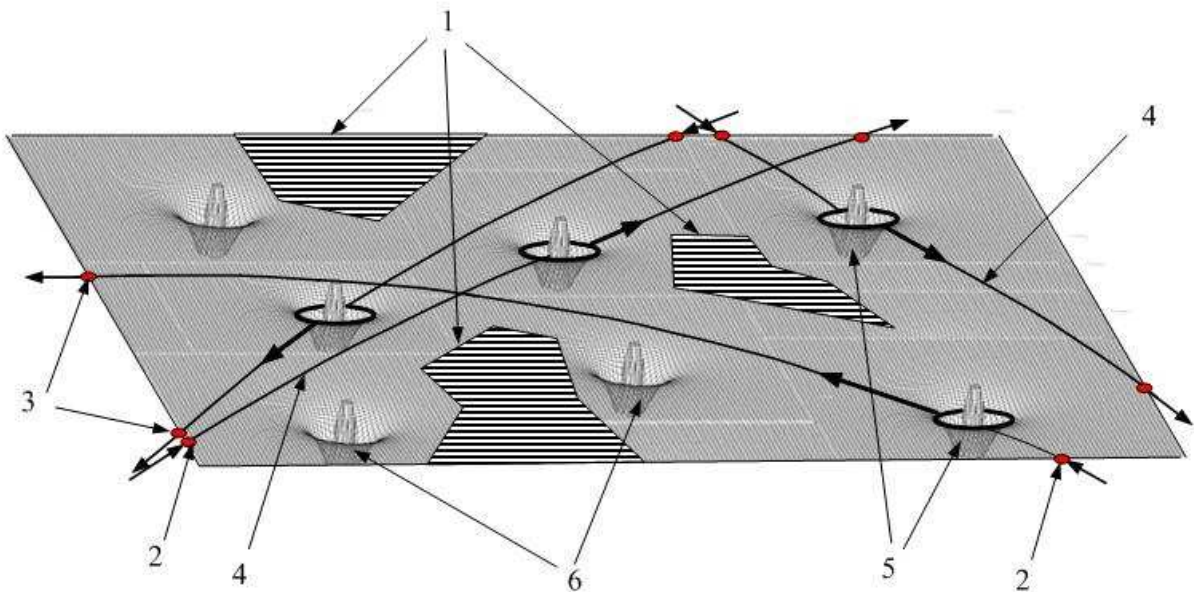


Рис. 3. Загальний віртуальний підпростір ViAN-світу:
 1 – зони заборони руху об'єктів;
 2 – точки входу об'єктів у загальний віртуальний підпростір ViAN-світу;
 3 – точки виходу об'єктів із загального віртуального підпростору ViAN-світу;
 4 – геодезичні лінії руху об'єктів;
 5 – динамічні гравітувальні об'єкти загального простору ViAN-світу;
 6 – інші гравітувальні об'єкти загального віртуального світу

Аксиома 3. Повний набір гравітаційних сил будь-якого об'єкта ViAN-світу має властивість симетрії. Із позицій класичної механіки симетрія гравітаційних полів кожного об'єкта ViAN-світу означає, що позитивне гравітаційне поле існує одночасно з негативним гравітаційним полем [23].

Аксиома 4. Гравітуюча система утворена відкритою множиною гравітуючих об'єктів і є неоднорідною. Об'єкти ViAN-світу мають різні пріоритети, зумовлені їх характеристичною масою.

Аксиома 5. Природні обмеження ViAN-світу розглядаються як щільна сукупність нерухливих гравітувальних об'єктів з відповідною масою.

Аксиома 6. Стартові й фінішні позиції кожного об'єкта ViAN-світу також є гравітуючими об'єктами з масами, що перевершують маси активних (рухливих) елементів ViAN-світу.

Аксиома 7. Рух кожного активного об'єкта здійснюється по геодезичних лініях сумарного гравітаційного простору відповідно до вкладеної в нього енергії.

Зауваження. Геодезичні лінії – це лінії в просторі, дуги яких є найкоротшими шляхами між їхніми кінцями.

Аксиома 8. Кожний динамічний об'єкт ViAN-світу індивідуально визначає свою геодезичну лінію, що містить фінішну точку.

Аксиома 9. Кінематичні властивості динамічних об'єктів ViAN-світу визначаються їх енергетичними, техніко-економічними і параметричними характеристиками реальних об'єктів аеронавігаційного простору, а також фізико-механічними властивостями реально-го аеронавігаційного середовища.

Аксиома 10. Еволюція функціонального стану кожного об'єкта ViAN-світу істотно залежить від енергії, вкладеної в нього для цільового функціонування, характеру топології геодезичних траєкторій руху об'єкта і визначає інтервали життєвого циклу об'єкта в ViAN-світі.

Формалізовані характеристики об'єктів ViAN-світу доцільно одержувати в результаті моделювання багатофункціональної інформаційно-енергетичної моделі складної технічної системи.

У роботах [24–27] розкрито головні концептуальні положення моделювання динамічних процесів еволюції стану складних, функціонально цілісних технічних систем на всьому інтервалі їх життєвого циклу на основі використання інформаційно-енергетичної моделі загального положення.

Синтезована тристратна структура моделі дозволяє адекватно відобразити реальні фізичні процеси деградації технічного стану системи, а також енергетичні й техніко-економічні процеси, що протікають при цьому в системі.

Модель є системною основою для синтезу комплексного управління функціональним і технічним станами складної системи на розширеному експлуатаційному інтервалі її життєвого циклу.

Аксиоми 1–11 формують ViAN-світ як загальну гравітаційну модель аеронавігаційного простору, вільну від евристик і неповноти функціонального забезпечення (рис. 4).

Модель визначається кількістю учасників і дозволяє:

- формувати образ гравітаційних полів ViAN-світу як загальну топологічну модель аеронавігаційного простору;

- звільнити кожного учасника повітряного руху від необхідності формування і розрахунку траєкторій руху при польоті за концепцією Free Flight;

- мінімізувати складність моделі аеронавігаційного простору й виключити «прокляття розмірності».

Кожний динамічний об'єкт PhAN-світу (рис. 5) подається кінематичною моделлю вигляду:

$$\frac{dx}{dt} = f(V, \varphi, x),$$

$$x_0(t_0) \in X_0, x_k(t_k) \in X_k, \quad (2)$$

$$V \in (0, V_{\max}), \varphi \in (0^0, 360^0),$$

де dx/dt – вектор швидкості об'єкта, обумовлений вимогами, пропонованими концепціями Free Flight, Zone Navigation, Open Sky;

x – просторова координата об'єкта у фізичному просторі;

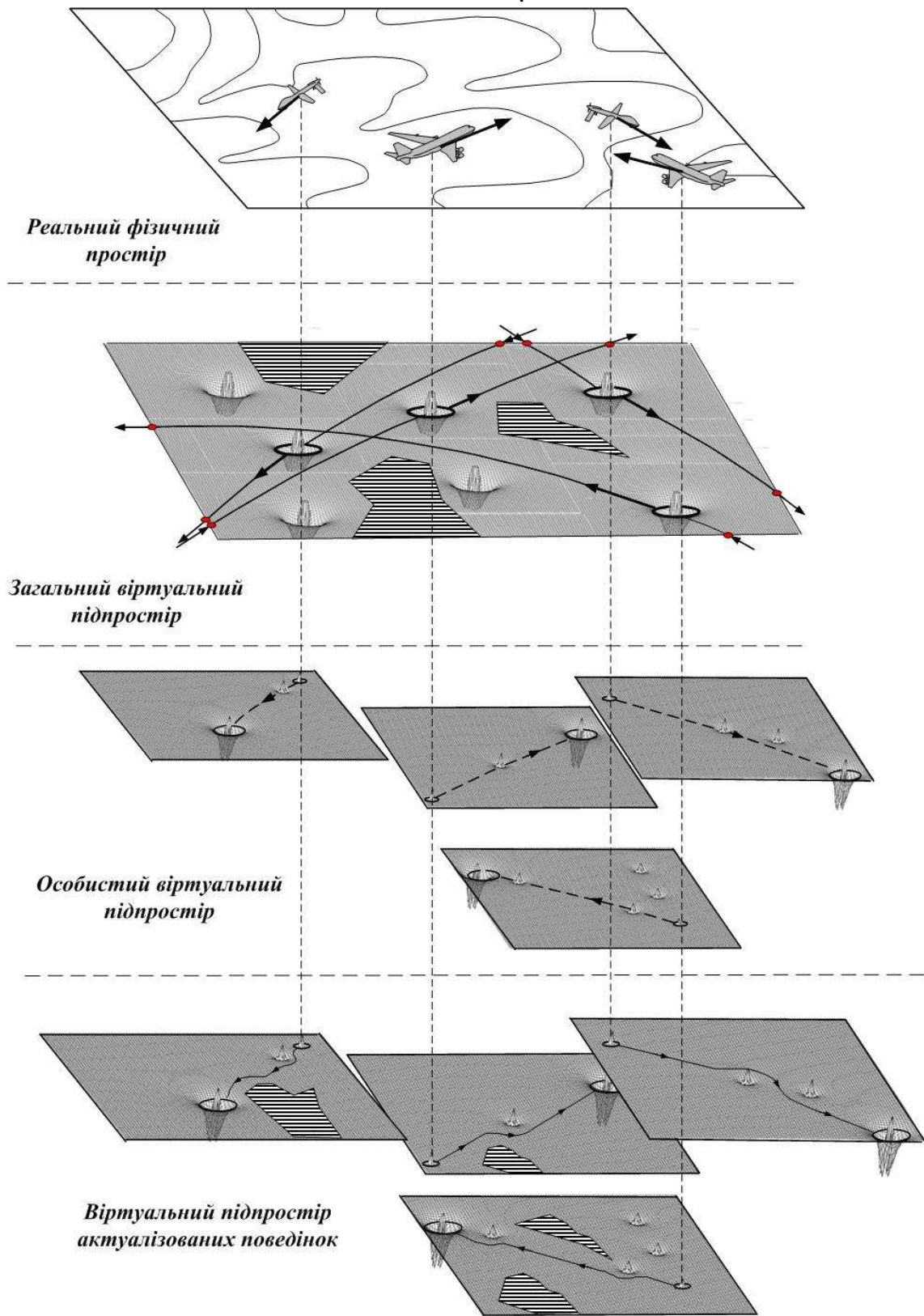


Рис. 4. Концептуальне зображення структури системи управління повітряним рухом в середовищі CNS/ATM

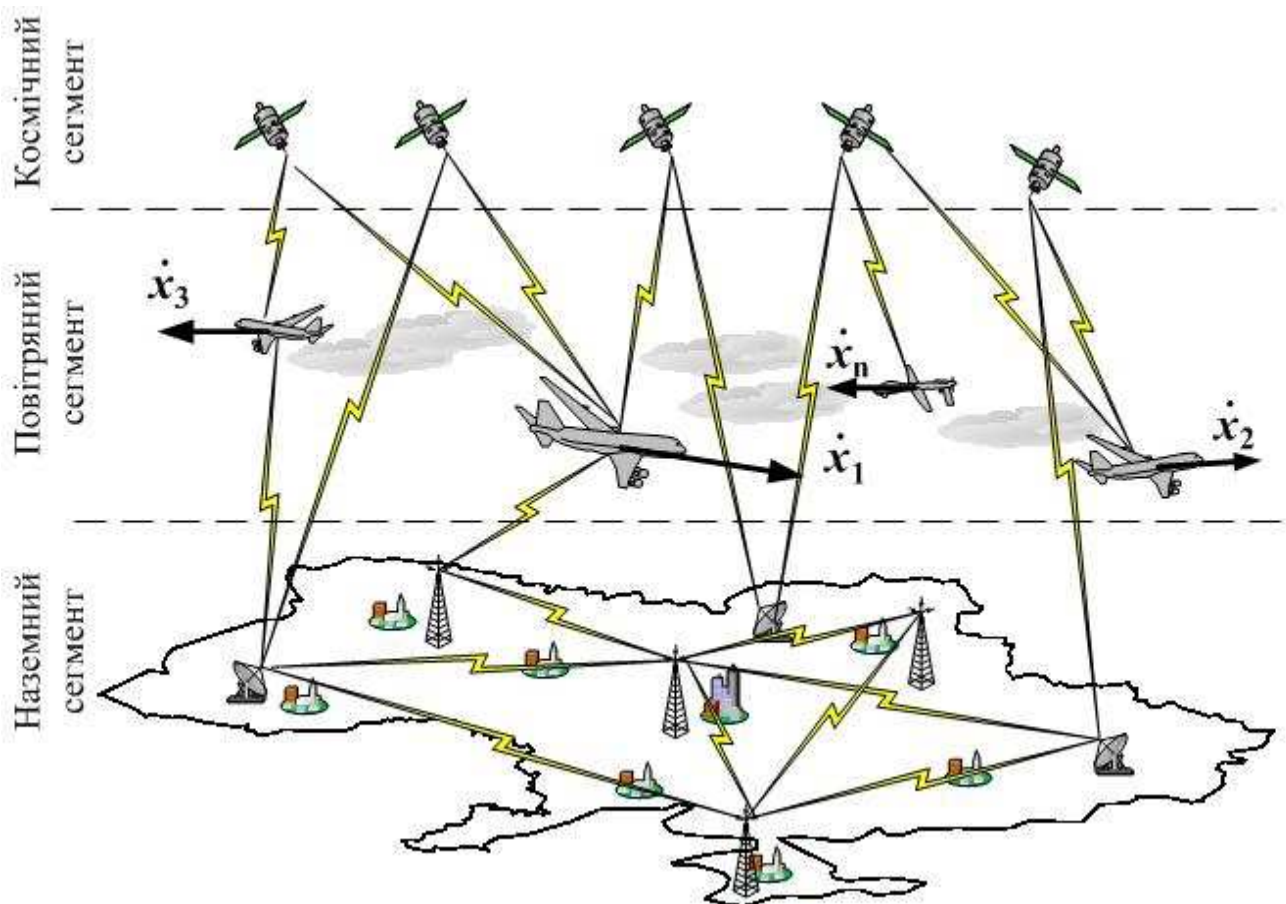


Рис. 5. Зображення PhAN-миру як складної динамічної розподіленої системи

X_0 – множина стартових позицій об'єкта;

X_k – термінальна множина.

Управління об'єктом здійснюється в кінематичній моделі (2) вибором модуля вектора швидкості V і вибором вектора φ орієнтації вектора dx/dt .

Управління об'єктом містить два рівні:

– зовнішній (змушений), градієнтний, по індивідуальній геодезичній лінії об'єктів аеронавігаційного простору;

– внутрішній (бажаний) – Free Flight.

Зовнішнє управління є рівнем об'єктивного управління.

Внутрішнє управління орієнтує об'єкт у системі геодезичних координат і перехід з однієї геодезичної лінії на іншу виходячи з суб'єктивних намірів учасників повітряного руху.

ViAN-світ є робастним і грубо визначає систему віртуальних геодезичних ліній у реальному фізичному просторі.

Висновки

1. Запропоновано структуру модельного енергетично-потенціального зображення аеронавігаційного середовища, яка дозволяє вирішити проблему «прокляття розмірності» при синтезі управління повітряним рухом, зокрема, проблему складності розв'язання багатомірних (більше трьох) конфліктів між учасниками повітряного руху.

2. Формалізація модельного зображення середовища CNS/ATM у рамках природничо-наукового системного підходу суттєво спрощує реалізацію концепції Free Flight із підвищеним рівнем безпеки.

Література

1. *World Wide CNS/ATM Systems Implementer* // ICAO, RIO Conference 1998.
2. *Demystifying CNS/ATM* // Report CANSO CNS/ATM Working Group, Final Version – June 1999.
3. *Hoekstra J.* Free Flight in a Crowded Airspace? / J. Hoekstra, R. Ruigrok, R. Gent. – Napoli. – 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, 13-16 June, 2000.
4. *Cloerec A.* Traffic Complexity Analysis To Evaluate The Potential for Limited Delegation of Separation Assurance to the Cockpit / A. Cloerec, K. Zeghal, E. Hoffman // IEEE Trans. 1999. - 5.A.5-1 - 5.A.5-8.5. *EUROCONTROL.* Long-Term Forecast of Flights (2004 – 2025). – 2004. – 32 p.
6. *Stability of Intersecting Aircraft Flows Using Heading-Change Maneuvers for Conflict Avoidance* / Z.-H. Mao, D. Dugail, E. Feron, K. Bilimoria // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2005. – Vol. 6, 4. – P. 357–369.
7. *Krozel J.* Decentralized control techniques for distributed air/ground traffic separation / J. Krozel, M. Peters. – Seagull Technology Inc. – 2000. – 104 c.
8. *Krozel J.* Free Flight Research Issues and Literature Search / J. Krozel // Los Gatos: Seagull Technology Inc. – 2000. – 88 p.
9. *McInnes C. R.* Velocity field path-planning for single and multiple unmanned aerial vehicles / C. R. McInnes // The Aeronautical Journal, July 2003. – P. 419–426.
10. *Stanley A.* Flight Path Deconfliction of Autonomous UAVs / A. Stanley // AIAA 2005-6978, in Infotech@Aerospace, Arlington, Virginia, 26 - 29 September 2005. – P. 1–21.
11. *Unmanned Aircraft Collision Avoidance Using Partially Observable Markov Decision Processes* / S. Temizer, M. Kochenderfer, L. Kaelbling, T. Lozano-Perez, J. Kuchar // Project Report ATC-356, MIT Lincoln Laboratory, Lexington, MA, 2009.
12. *Kuchar J. K.* A review of conflict detection and resolution modeling methods / J. K. Kuchar, L. C. Yang // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2000. – Vol. 1, N. 4. – P. 179–189.
13. *Загора С.А.* Аналіз методів розв'язання конфліктних ситуацій в умовах вільного польоту / С.А. Загора // Вісник НАУ. – 2005. – №1. – С. 42–47.
14. *Сейдж Э.* Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э. Сейдж, Дж. Мелс. – М.: Связь, 1976. – 495 с.
15. *Меркулов В.М.* Математические модели информационно-управляющих систем в пространстве состояний / В.М. Меркулов, В.П. Харьков, А.В. Рогов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – М.: Радиотехника, 2006. – №7, Т.4. – С. 35–43.
16. *Zeghal K.* A review of different approaches based on force fields for airborne conflict resolution / K Zeghal // Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. – 1998. – P. 818–827.
17. *Eby M.* Free flight separation assurance using distributed algorithms / M. Eby, W. Kelly // Proc. 1999 IEEE Aerospace conf., Snowmass. – 1999. – P. 429–441.
18. *Кунцевич В.М.* Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В.М. Кунцевич. – К.: Наукова думка, 2006. – 264 с.
19. *Chernousko F.L.* New Results of Optimal Ellipsoidal Estimation for Uncertain Dynamic Systems / F.L. Chernousko, A.V. Shmatkov // Pr. of 15th World Congress IFAC, Barselona, Spain, 2002. – 6 p.
20. *Krotov V.F.* Natural Achievements in control theory (The Aerospace Perspective) / V.F. Krotov, A.V. Kurzhanski. – Режим доступа: – <http://asa2004.aanet.ru.004.pdf>.
21. *Kurzhanski A.V.* Ellipsoidal techniques for hybrid dynamics: the reachability problem / A.V. Kurzhanski, P. Varaiya; ed. by W.P. Dayawansa, A. Lindquist, Y. Lhon // New Direction and Applications in Control Theory, Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer, 2005. Vol. 321. – 193 p. – Режим доступа: <http://paleale.eecs.barkeley.edu/~varaiya/papers.ps.dir/hibridreach.pdf>.

22. *Эйнштейн А.* Эволюция физики / А. Эйнштейн, Л. Инфельд. – М.: Наука, 1965. – 296 с.
23. *Жилкин А.Г.* Об Эйнштейновских силах отталкивания / А.Г. Жилкин, В.А. Клименко, А.М. Фридман // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 435, №6. – С. 748–751.
24. *Чепиженко В.И.* Математическая модель динамики функционального состояния управляемой системы на всем эксплуатационном интервале жизненного цикла / В.И. Чепиженко, В.В. Павлов // Кибернетика и вычислительная техника. – 2010. – № 162. – С. 3–45.
25. *Чепиженко В.И.* Підхід до управління функціональним станом складних технічних систем на експлуатаційному інтервалі їх життєвого циклу / В.И. Чепиженко // Вісник НАУ. – 2010. – № 2. – С. 53–57.
26. *Чепиженко В.И.* Енергетична концепція ядра для моделювання CALS-процесів у складних технічних системах / В.И. Чепиженко // Вісник НАУ. – 2009. – № 3. – С. 76–82.
27. *Павлов В.В.* Многофункциональная динамическая модель структурного фрактала сложной технической системы / В.В. Павлов, В.И. Чепиженко // Вісник НАУ. – 2010. – № 1. – С. 89–99.

Стаття надійшла до редакції 05.07.2011.