

С.А. Загора, аспір.
Національний авіаційний університет

ПОШУК ОПТИМАЛЬНОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ РОЗВ'ЯЗАННЯ КОНФЛІКТНИХ СИТУАЦІЙ ДЛЯ СУКУПНОСТІ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

(Представлено д.т.н., проф. Клименко С.А.)

Розглянуто проблему пошуку оптимального розв'язання конфліктних ситуацій за участю довільної кількості літаків в умовах застосування концепції вільного польоту. Оптимізаційна задача представлена у комбінаторному вигляді і розв'язана з використанням методу звужуваних околів. Як цільова функція запропоновано сумарний показник ефективності виконання безпечних маневрів.

Постановка завдання в загальному вигляді. Розробка та застосування передових технологій навігації, зв'язку та керування динамічними об'єктами традиційно тісно пов'язана з авіаційною галуззю і, зокрема, з організацією повітряного руху (ОПР). Підвищення точності літаководіння завдяки розвитку сегмента користувача супутникових навігаційних систем GPS, ГЛОНАСС і, у найближчому майбутньому, Galileo, дозволяє зменшити норми ешелонування повітряних суден (ПС). Це, в свою чергу, сприяє збільшенню пропускної здатності елементів системи ОПР і дозволяє більш ефективно використовувати повітряний простір при гарантованому рівні безпеки польотів. Крім того, останнім часом у країнах Європи і Північної Америки серйозно розглядається можливість застосування концепції вільного польоту Free Flight [1], відповідно до якої ПС зможуть відхилятися від запланованих траєкторій у встановлених межах для більш ефективного і безпечного здійснення польоту. Передбачається, що критерії ефективності визначає авіакомпанія або пілот, у той час як критерій безпеки залишається для всіх єдиним – підтримання безпечного розділення всіх ПС у просторі та часі. Впровадження Free Flight стане можливим завдяки інтеграції на борту ПС навігаційного устаткування GPS/ГЛОНАСС, апаратури автоматичного залежного спостереження ADS-B, цифрового каналу зв'язку диспетчер–пілот CPDLC і системи запобігання зіткнень TCAS. Очікується, що Free Flight дозволить знизити навантаження на наземних диспетчерів за рахунок часткової передачі відповідальності щодо ешелонування ПС з землі безпосередньо на борт. Однак такий перехід можливий тільки завдяки існуванню надійних систем безпечного розділення ПС в польоті. Тому цілком обґрунтованим є підвищений інтерес наукового співтовариства до проблеми прогнозування і усунення потенційно-конфліктних ситуацій між ПС. В даній роботі увага акцентується саме на етапі розв'язання попередньо виявлених конфліктних ситуацій.

Аналіз існуючих підходів до проблеми розв'язання конфліктних ситуацій між ПС. На сьогоднішній день в основному застосовуються тактичні системи запобігання зіткнень типу TCAS, що здатні прогнозувати та вирішувати конфлікти на часовому інтервалі не більше 1 хвилини, у той же час роботи зі створення стратегічних систем безпечного ешелонування (ASAS) з інтервалом прогнозування до 10–20 хвилин вимагають подальшої розробки.

В процесі розв'язання конфліктної ситуації основним етапом неодмінно є розрахунок безпечного маневру для кожного з учасників конфлікту. При цьому часто виконують пошук оптимальних траєкторій відповідно до деякої цільової функції. Оптимізація проводиться як у локальних, тобто для одного або двох ПС [2], так і у глобальних масштабах – для всієї сукупності ПС [3], що істотно збільшує обсяг обчислень і робить багато методів практично нереалізованими. Обговорення питань, присвячених цій тематиці, можна також знайти в роботах [4], [5].

У випадку вільного польоту розв'язання конфліктних ситуацій має ряд особливостей. Насамперед, це: умовно-довільні траєкторії ПС, невизначеність намірів ПС внаслідок помилок прогнозування, втрати зв'язку або інших факторів, необхідність видачі оптимального розв'язання виникаючих конфліктів за достатньо великий період часу (до 20 хв.), а також можливе виникнення конфліктів за участю декількох ПС, що значно підвищує складність завдання. Аналіз даних про повітряний рух у найбільш завантажених областях Європи [6] свідчить про зростання кількості конфліктів за участю 2, 3 і 4 літаків. З огляду на зазначені особливості, очікується, що при Free Flight складність конфліктів ще збільшиться, а швидкодія алгоритмів пошуку оптимального розв'язання таких конфліктів стане критичним параметром для систем ОПР.

Послідовність розв'язання конфліктної ситуації. Розв'язання складного конфлікту (за участю більш ніж двох ПС) можна представити у вигляді почергового перепланування траєкторії кожного з учасників конфлікту відповідно до встановленої послідовності. Припустимо, що для сукупності конфліктуючих літаків $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, така послідовність існує і має вигляд

$$\rho = (i_1, i_2, \dots, i_k, \dots, i_n), \quad (1)$$

де i_k – номер ПС, що має k -ту позицію у послідовності p ; n – загальна кількість ПС, що беруть участь у конфлікті.

Процес послідовного розв’язання конфлікту відповідно до послідовності p можна представити наступним чином. Спочатку ПС з номером i_2 планує безконфліктний маневр відносно ПС з номером i_1 , яке не змінює своєї початкової траєкторії (рис. 1, а). Інший можливий варіант – обидва ПС з номерами i_1 та i_2 вирішують конфлікт спільно (рис. 1, б). Моменти початку попередньо виявлених конфліктів на рис. 1 позначено у вигляді дотикання кругових захисних зон, які відповідають встановленим нормам безпечного ешелонування ПС. Планування безконфліктної траєкторії передбачає обов’язкове виконання умови безпечного ешелонування всіх учасників повітряного руху. Далі ПС з номером i_3 планує свою траєкторію таким чином, щоб не порушити інтервал безпечного ешелонування з ПС i_1 та i_2 . Аналогічно виконуємо побудову безконфліктних траєкторій для наступних ПС відповідно до послідовності p до тих пір, поки не буде побудовано безконфліктну траєкторію для ПС з номером i_n (рис. 1, в). В результаті буде виконано максимум n операцій перепланування. Слід зазначити, що таке розв’язання конфліктів вимагає чіткої узгодженості дій усіх ПС, наприклад, шляхом обміну змінами в планах польоту через канал передачі даних ADS-B.

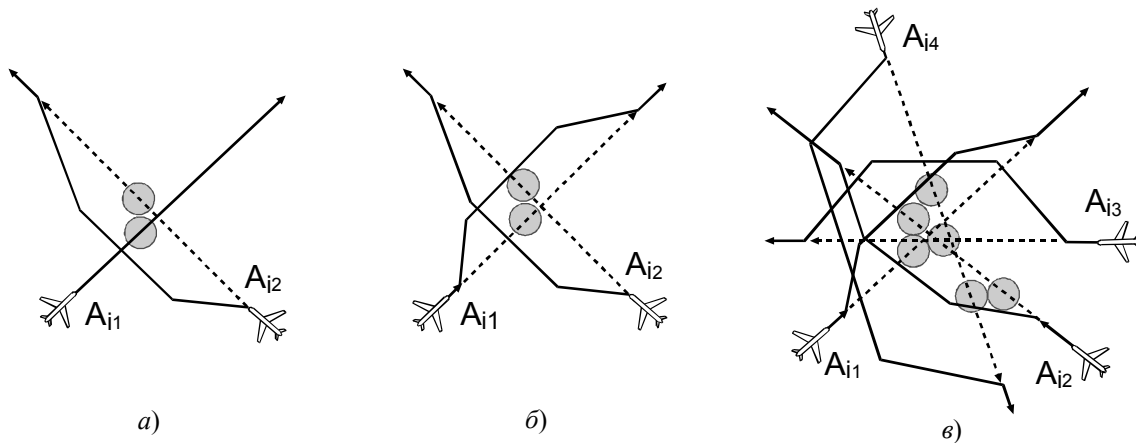


Рис. 1. Можливий варіант послідовного планування траєкторій

З точки зору комбінаторної теорії, будь-яку впорядковану послідовність ПС можна представити перестановкою p їх номерів, а множину усіх порядків – простором перестановок Π . Якщо ввести деякий функціонал $f(p)$, заданий на множині перестановок Π , який буде характеризувати перестановку p за певними показниками ефективності, то виникає задача пошуку такої перестановки p_0 серед усіх можливих перестановок $p \in \Pi$, при якій досягається мінімум критерію $f(p)$, тобто:

$$p_0 = \arg \min_{p \in \Pi} f(p). \tag{2}$$

Вибір цільової функції. Функціонал $f(p)$, який в даному випадку є цільовою функцією, повинен відображати сумарні витрати всіх ПС при розв’язанні конфлікту для конкретної перестановки p . Оскільки розв’язання конфлікту здійснюється кожним ПС через виконання серії маневрів, наведемо можливі характеристики маневрів, які можуть входити до складу функціонала:

- просторове та часове відхилення від початкової траєкторії;
- величина відхилення за швидкістю;
- витрати палива на виконання маневру;
- складність маневру (кількість ділянок траєкторії, її геометрія).

Найбільш інформативним є сукупний показник, який поєднує часові та просторові витрати на виконання маневру у вигляді площі, обмеженої траєкторією безпечного маневру і початковою траєкторією. Цей показник враховує накопичення просторового відхилення від планової траєкторії у часі й має такий вигляд для i -го ПС

$$F_i = m_R R_i + m_S S_i + m_N N_i + m_\tau \Delta \tau_i + m_M M_i \quad (i = 1, 2, \dots, n), \tag{3}$$

де R_i – кількість невирішених конфліктів за участю літака A_i ; S_i – площа маневру; N_i – кількість ділянок траєкторії, що складають маневр; $\Delta \tau_i$ – часове відхилення від планової траєкторії; M_i – кількість маневрів, якщо їх заплановано декілька; $m_R, m_S, m_N, m_\tau, m_M$ – вагові коефіцієнти. Для $M_i = 0$ приймемо $F_i = 0$.

Необхідність врахування $\Delta\tau_i$ у формулі (3) обумовлена тим, що контроль відхилення від плану за часом є одним з найважливіших завдань сучасних і майбутніх систем ОПР. Крім того, така складова дозволяє одержувати різні значення витрат F_i для двох маневрів, які мають однакову площу та кількість проміжних ділянок, як показано на рис. 2 для траєкторій з номерами 1 і 2. Очевидно, що при постійній швидкості довжина шляху в другому випадку буде більша, ніж в першому, отже, будуть відрізнятися й часові відхилення від плану в точці B . На рис. 2 площі S_1 і S_2 обрані рівними, тому маневри 1 і 2 можна відрізнити, тільки оцінивши їх значення $\Delta\tau_i$.

Запишемо функціонал, який буде визначати сумарні витрати всіх ПС при побудові безконфліктних траєкторій відповідно до перестановки p :

$$f(p) = \sum_{i=1}^n (m_R R_i + m_S S_i + m_N N_i + m_{\tau} \Delta\tau_i + m_M M_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (4)$$

В наведеній формулі площа маневру в горизонтальній площині може бути визначена за допомогою такого виразу:

$$S_i = \int_{x_{M_i}}^{x_{R_i}} |y_{0_i}(x) - y_{M_i}(x)| dx, \quad (5)$$

де $y_{0_i}(x), y_{M_i}(x)$ – лінії шляху початкового плану і маневру i -го ПС у горизонтальній площині; x_{M_i}, x_{R_i} – координати точки початку та кінця маневру.

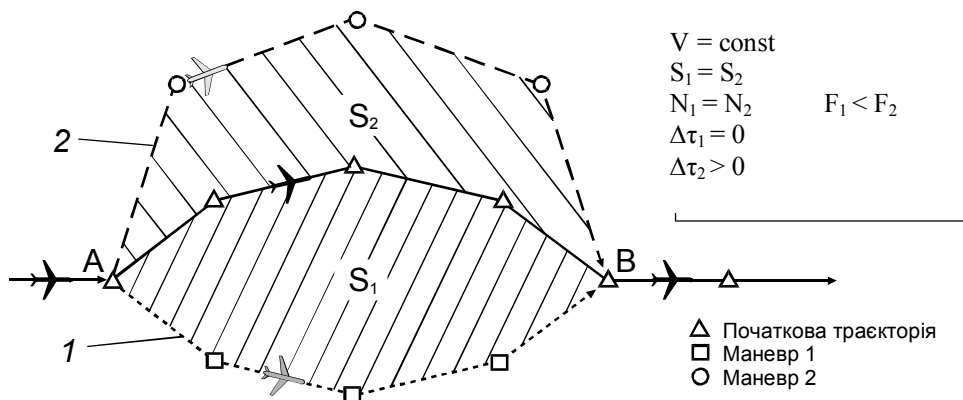


Рис. 2. Оцінка площі маневру

Пошук оптимального розв'язання конфліктних ситуацій. Значення функціоналу (4) суттєво залежать від взаємного геометричного розташування ПС в момент пошуку рішення, а також від обраного типу запобіжного маневру. Тому визначити розривність та полімодальність цільової функції заздалегідь практично не можливо. Мінімізація $f(p)$ в загальному випадку є багатоекстремальною комбінаторною задачею. У зв'язку з тим, що простір перестановок є дискретним, методи мінімізації, пов'язані з градієнтним спуском, тут не можуть бути застосовані. Однак дискретна природа простору Π дозволяє виконати повний перебір всіх значень функціоналу для відшукування глобального мінімуму, а саме перевірити $n!$ значень функціоналу $f(p)$ для n ПС. Але вже при порівняно невеликих значеннях n кількість можливих перестановок сильно зростає. Наприклад, для розв'язання конфлікту за участю 15 ПС загальна кількість можливих перестановок перевищує 10^{12} . Очевидно, що виконувати повний перебір усіх перестановок для відшукування оптимального порядку розв'язання конфлікту в реальному масштабі часу є важкою задачею навіть при сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки. Ситуація ускладнюється трудомісткістю обчислення окремих значень розглянутого функціонала.

В роботі [7] для мінімізації функціоналів, заданих на перестановках, запропоновано метод звужуваних околів, який дозволяє ефективно знаходити глобальний мінімум при великій кількості перестановок. Метод використовує припущення, що значення функціоналу є випадковою величиною з деяким законом розподілу (в [7] розглянуто нормальний закон розподілу), а у множини перестановок існує певна система околів. Особливості методу полягають у виборі радіусу околів та оцінці збіжності значень функціонала.

Моделювання процесу пошуку оптимального розв'язання. Для моделювання роботи методу було розроблено алгоритм, що дозволяє реалізовувати описану вище стратегію послідовного розв'язання конфліктних ситуацій відповідно до заданого порядку p . Узагальнена схема пошуку оптимального розв'язання конфлікту із застосуванням методу звужуваних околів та алгоритму послідовного розв'язання наведена на рис. 3.

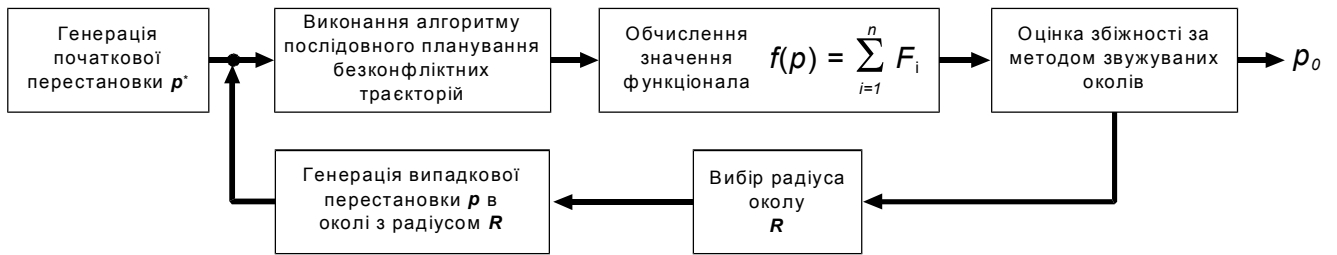


Рис. 3. Узагальнена схема алгоритму пошуку оптимального розв'язання конфлікту

Для побудови наближеного закону розподілу значень функціонала (4) було проведено комп'ютерне моделювання за допомогою спеціально розробленого програмного комплексу для тестування алгоритмів розв'язання конфліктів [8]. За основу було взято сценарій конфліктної ситуації типу «зірка» (рис. 4) за участю 8 ПС, відповідно до якого всі учасники в початковий момент розташовані на одному ешелоні польоту і рівномірно розподілені по периметру великого кола діаметром 400 км, а потім починають сходитися до його центру, в результаті чого виникає складний конфлікт із залученням всіх ПС. Параметри ПС були взяті такі: постійна швидкість 750 км/год. відхилення початкового курсу від напрямку на центр кола $\pm 5^\circ$, тип запобіжного маневру – ухилення за курсом в горизонтальній площині зі сталою швидкістю.

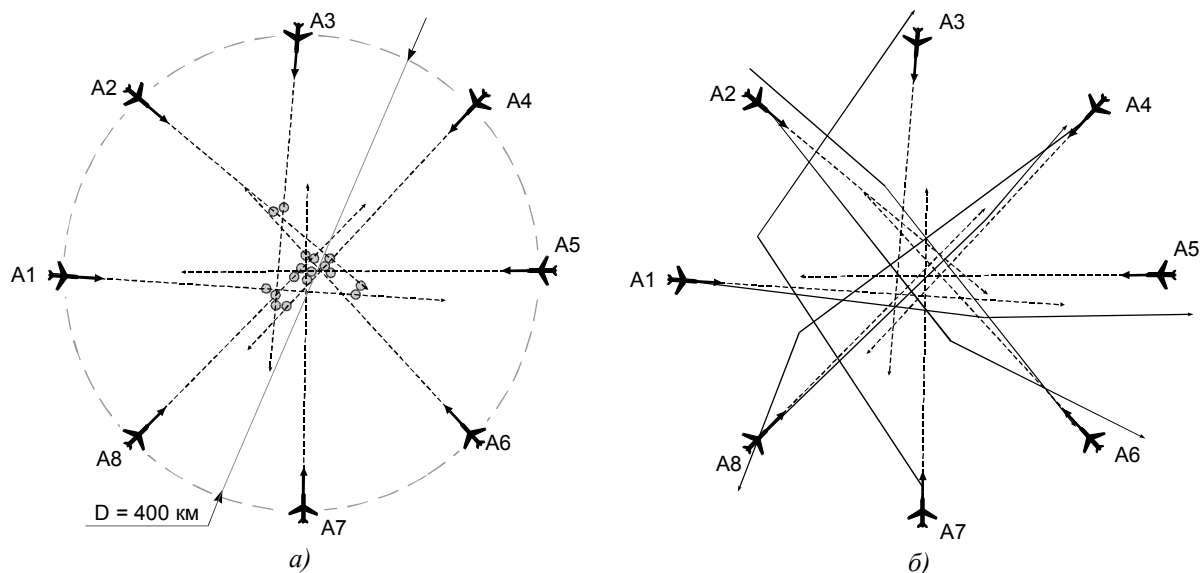


Рис. 4. Конфлікт типу «зірка»: а) – початкова ситуація; б) – розв'язання за курсовим кутом відповідно до знайденої оптимальної послідовності $\rho_0 = (A_1, A_8, A_2, A_3, A_4, A_6, A_5, A_7)$

Результати моделювання значень функціонала (4) на всій множині перестановок (всього $8! = 40320$ перестановок) при кількості учасників конфлікту $n = 8$ і параметрах функціонала $m_R = 10^7$, $m_S = 1$, $m_N = 3 \cdot 10^5$, $m_T = 10^5$, $m_M = 0$ наведено на рис. 5. Як запобіжний маневр для кожного літака також обрана тимчасова зміна курсу при сталих швидкості та висоті польоту. Знайдене шляхом повного перебору мінімальне значення $f(p)$ відповідає перестановці $\rho_0 = (A_1, A_8, A_2, A_3, A_4, A_6, A_5, A_7)$ з номером 4322 (номери перестановок подано відповідно до лексикографічної метрики [7]). Слід зазначити, що на отримання множини значень $f(p)$ шляхом повного послідовного перебору було витрачено значний час порядку 50 хвилин (параметри ПЕОМ: Pentium 1,5 ГГц 512 Мб ОЗУ).

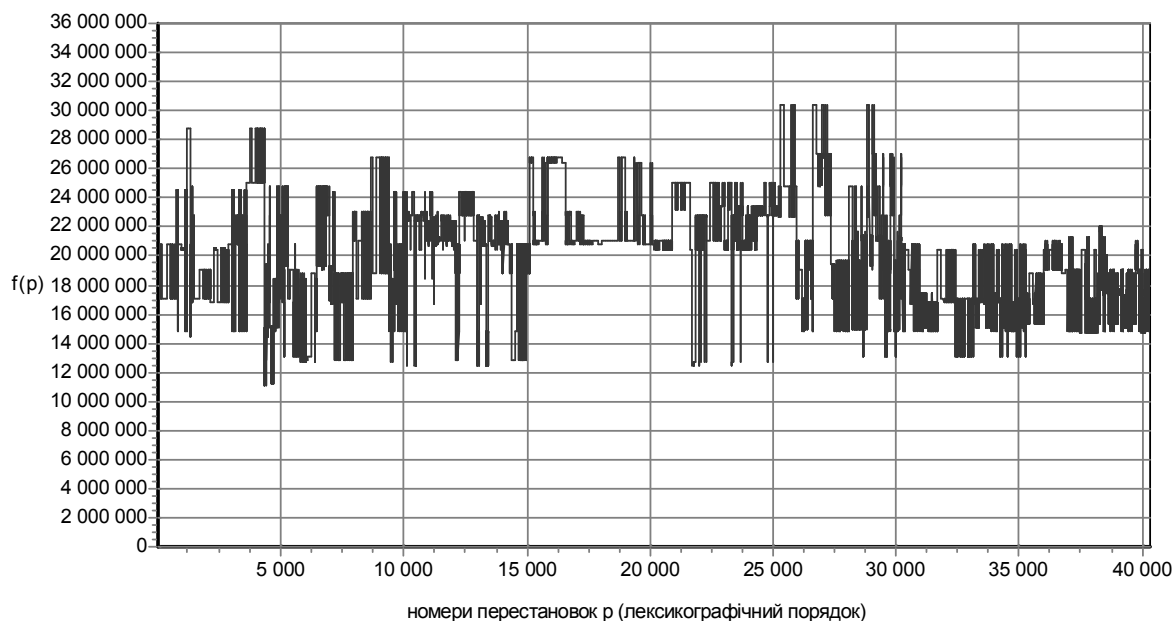


Рис. 5. Моделювання значень функціонала $f(p)$

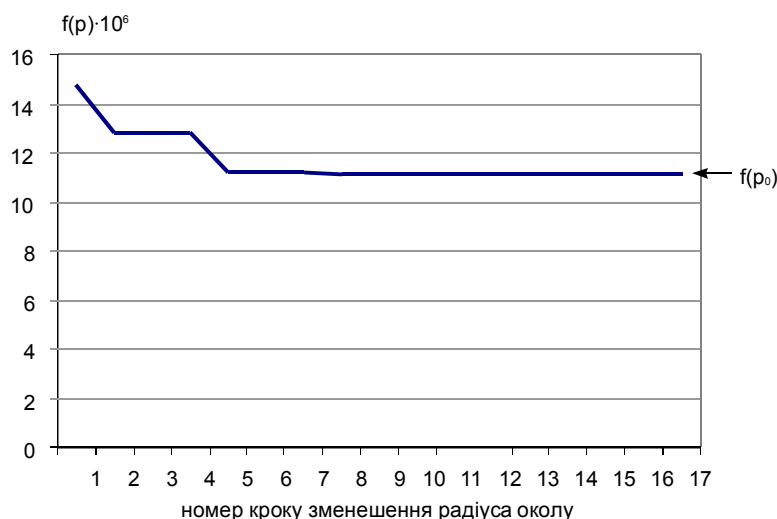


Рис. 6. Збіжність результатів пошуку до глобального мінімуму $f(p_0)$

Як видно з рис. 5, значення функціонала мають характер випадкового процесу. Це підтверджує необхідність застосування саме нетрадиційних способів пошуку глобального мінімуму, подібних до методу звужуваних околів. Збіжність результатів пошуку оптимальної перестановки до глобального мінімуму $f(p)$ при використанні методу звужуваних околів представлено на рис. 6. Зменшення радіусу околу пошуку виконувалось поступово за правилом діхотомії від значення 40320 до 1 у лексикографічній метриці. Всього було здійснено 16 кроків зменшення радіусу околу. На кожному кроці знаходилась локальна оптимальна перестановка і в її околі з поточним радіусом формувалась вибірка з 50 довільних перестановок. При цьому вже на 5-му кроці було отримано мінімальне значення $f(p_0)$ та відповідна оптимальна перестановка p_0 .

Висновки. Запропонований підхід дозволяє здійснювати ефективний пошук оптимального розв'язання складних конфліктних ситуацій, що є особливо актуальним при підвищеній інтенсивності повітряного руху і наявності умовно-довільних траєкторій ПС.

Подальші дослідження в цьому напрямку планується зв'язати з розробкою адекватних алгоритмів послідовного розв'язання конфліктних ситуацій, застосованих для даного способу пошуку оптимальної послідовності p . Особливу увагу при цьому буде приділено вивченню можливості застосування цих алгоритмів для реальних моделей руху ПС, а також врахування невизначеності при прогнозуванні

положення ПС. Також планується оцінити обчислювальну потужність розроблених алгоритмів у порівнянні з іншими алгоритмами комбінаторного пошуку.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *EUROCONTROL*. Airspace Strategy for the ECAC States. Edition 1.0 – Eurocontrol. – 2001. – 91 p.
2. *Hu J., Prandini M., Sastry S.* Optimal maneuver for multiple aircraft conflict resolution: A braid point of view // Proc. of the 39th IEEE conf. on decision and control. – Sydney. – 2000. – Vol. 4. – P. 4164–4169.
3. *Tomlin C., Pappas G., Sastry S.* Conflict resolution for air traffic management: A study in multi-agent hybrid systems // IEEE Transactions on automatic control. – 1998. – Vol. 43. – 4. – P. 509–521.
4. *Kuchar J.K., Yang L.C.* A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2000. – Vol. 1. – 4. – P. 179–189.
5. *Закора С.А.* Аналіз методів розв'язання конфліктних ситуацій в умовах вільного польоту // Вісник НАУ. – 2005. – № 1. – С. 42–47.
6. *Cloerac A., Zeghal K., Hoffman E.* Traffic Complexity Analysis to Evaluate the Potential for Limited Delegation of Separation Assurance to the Cockpit // IEEE Trans. 1999. – P. 5.A.5-1–5.A.5-8.
7. *Стоян Ю.Г., Соколовский В.З.* Решение некоторых многоэкстремальных задач методом сужающихся окрестностей. – К.: Наук. думка, 1980. – 208 с.
8. *Kharchenko V.P., Zakora S.A.* Software Architecture Of Modeling System For Comparison Of Aircraft Conflict Resolution Algorithms // The Second World Congress "Safety in Aviation", NAU, Kyiv. – 2005. – P. 3.44–3.51.

ЗАКОРА Севастян Анатолійович – аспірант Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- розв'язання конфліктних ситуацій між повітряними суднами в умовах довільних маршрутів;
- моделювання та аналіз ситуацій повітряного руху.

E-mail: sevastian@ukr.net

Подано 22.05.2006