

# Математичні моделі та методи

УДК 656.7.084:519.81(045)

Д.В. Васильєв

Національний авіаційний університет, Київ

## МОДЕЛЬ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ВИБОРУ ТРАЄКТОРІЙ МАНЕВРУВАННЯ ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ КОНФЛІКТНИХ СИТУАЦІЙ МІЖ ЛІТАКАМИ

*Розглядається задача багатокритеріального вибору траєкторій маневрування для розв'язання конфліктних ситуацій між літаками. Розроблено модель вибору безконфліктної траєкторії з заданої множини можливих траєкторій маневрування за векторним критерієм оптимальності. Запропоновано спосіб визначення вагових коефіцієнтів важливості при застосуванні лінійної згортки критеріїв оптимальності.*

**Ключові слова:** безпека польотів, розв'язання конфліктної ситуації, багатокритеріальне прийняття рішень, згортка критеріїв оптимальності.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Розвиток аеронавігаційної системи в значній мірі спрямований на підвищення пропускнув спроможності в умовах постійного збільшення інтенсивності польотів. Для цього впроваджуються новітні процедури керування повітряним рухом, методи навігації, засновані на характеристиках (Performance-based Navigation), зменшуються норми ешелонування, виділяються зони повітряного простору, у межах яких дозволено виконувати польоти за вільними маршрутами (Free Route Airspace). За таких умов значно зростає ймовірність виникнення конфліктних ситуацій між літаками.

Важливою задачею є створення нових методів і систем розв'язання конфліктних ситуацій, які повинні забезпечувати формування безконфліктних траєкторій польоту в умовах високої динамічності відносного руху літаків. Розв'язання конфліктної ситуації є багатокритеріальною задачею прийняття рішень, яка полягає у виборі такої програми маневрування літаків, яка забезпечить безпеку повітряного руху (наявний конфлікт буде усунуто) з урахуванням різних критеріїв, що характеризують ефективність виконання польоту.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Методи розв'язання конфліктних ситуацій можна поділити на методи, у яких задача розв'язання (запобігання) конфлікту вирішується знаходженням траєкторій польоту, що забезпечують тільки витримування безпечних відстаней між літаками, і оптимізаційні методи, у яких при пошуку маневрів задаються критерії оптимальності.

В більшості відомих методів [1, 3, 5] розв'язується задача усунення конфлікту шляхом зміни курсу польоту літаків та враховується один критерій оптимальності.

У методі, який запропонований в роботі [2], виконується вибір маневрів по зміні швидкості польоту для усунення групового конфлікту за векторним критерієм оптимальності, що утворюється з частинних критеріїв, кожен з яких характеризує втрати безпеки та ефективності маневрування одного літака, при цьому спосіб визначення частинних критеріїв не вказаний.

У методі, запропонованому в роботі [4], виконується багатокритеріальний пошук траєкторій маневрування для розв'язання групових конфліктів, векторний критерій оптимальності утворюється з частинних критеріїв, кожен з яких характеризує ефективність траєкторії одного літака за витратами палива та часом польоту, але спосіб визначення значень критеріїв не вказаний.

Доцільним є створення методів розв'язання конфліктних ситуацій, які враховують одночасно декілька критеріїв оптимальності для кожного літака, що дає змогу підвищити ефективність усунення конфлікту при застосуванні комбінованих маневрів по зміні курсу, швидкості та висоти польоту.

Для цього необхідно застосувати такі методи прийняття рішень, які використовують якісну та кількісну інформацію про множину частинних критеріїв оптимальності [7, 8].

**Постановка завдання.** В статті розглядається задача розв'язання конфліктної ситуації між двома літаками у повітряному русі.

Під конфліктною ситуацією розуміється ситуація, коли відстань між літаками в прогнозований момент їх найбільшого зближення є меншою безпечною мінімальною відстані (норми ешелонування).

Задачею розв'язання прогнозованої конфліктної ситуації є визначення безконфліктних просторово-часових траєкторій польоту літаків з урахуванням декількох критеріїв оптимальності та обмежень.

**Метою роботи** є розробка моделі багатокритеріального вибору траєкторій маневрування з заданої множини при розв'язанні конфліктних ситуацій між літаками. Завданням роботи є визначення альтернатив вибору, аналіз і вибір критеріїв оптимальності, визначення обмежень та процедури вибору оптимальної безконфліктної траєкторії з заданої множини можливих траєкторій маневрування.

### Альтернативи вибору, критерії оптимальності та обмеження

Альтернативами вибору є набір траєкторій польоту одного літака, який здійснює маневрування, або комбінації траєкторій двох літаків, які одночасно здійснюють маневрування з усунення конфлікту.

Під маневруванням розуміються зміна курсу, швидкості, висоти польоту або їх поєднання.

В загальному випадку критеріями оптимальності при розв'язанні конфліктних ситуацій є (рис. 1): безпека, регулярність та економічність польотів, складність маневрів, пріоритети літаків, та комфортність пасажирів при маневруванні.

Безумовним критерієм є безпека польотів, яка забезпечується витриманням норм ешелонування. Показником безпеки є ризик виникнення конфліктних ситуацій. Сучасні тенденції до збільшення інтенсивності польотів зумовлюють необхідність урахування критеріїв регулярності та економічності польотів. Показником регулярності є відхилення від плану польоту, показником економічності є додаткові витрати палива, зумовлені зміною режимів польоту при усуненні конфлікту.

Важливим критерієм з точки зору літаководіння та обслуговування повітряного руху є складність маневрів з усунення конфліктної ситуації. Показником складності є кількість змін профілю польоту та тривалість маневрування.

Необхідність окремого врахування критеріїв регулярності, економічності та складності маневрування пояснюється тим, що при виконанні літаками комбіно-

ваних маневрів (поєднання змін напрямку, швидкості та висоти польоту) сумарні відхилення від плану польоту, витрати палива і показники складності маневрування не мають прямої залежності між собою.

Також доцільно враховувати індивідуальні пріоритети літаків за технічним станом, залишком палива, видом рейсу. Так, маневрування не повинні здійснювати літаки з відмовами двигунів або обладнання, літаки, які виконують літерні та спеціальні рейси, літаки, які мають малий залишок палива.

Критерію комфортності останнім часом приділяється велика увага з боку авіаперевізників, оскільки виконання поворотів з великими кутами крену, різка зміна висоти та швидкості польоту призводить до погіршення комфортності пасажирів.

Множина можливих траєкторій формується з урахуванням різних обмежень, якими є: експлуатаційні обмеження за льотно-технічними характеристиками; правила використання повітряного простору; заборона виконувати польоти у зонах небезпечних метеорологічних явищ; правила розв'язання конфліктних ситуацій.

У додаткові обмеження перетворюються критерії пріоритетів літаків та критерій комфортності.

Обмеження визначають множину допустимих траєкторій  $D_x$ , з якої необхідно обрати безконфліктну та оптимальну за визначеними критеріями.

Множину можливих траєкторій (комбінацій траєкторій) позначимо:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} = \{x_j\}, x_j \in D_x, j = \overline{1, n}.$$

### Процедура вибору безконфліктної траєкторії польоту

Для відомої множини траєкторій задача пошуку оптимальної траєкторії формулюється наступним чином: з множини траєкторій  $X \in D_x$ , знайти таку

траєкторію  $x^*$ , яка забезпечує усунення конфліктної ситуації та відповідає критеріям регулярності, економічності і складності маневрування (мінімальним відхиленням від плану польоту, витратам палива і мінімальній складності маневрування).

Таким чином, критерій безпеки польотів перетворюється у обмеження, а оптимізація виконується за критеріями регулярності  $c_1$ , економічності  $c_2$  і складності маневрування  $c_3$ , які утворюють вектор критеріїв:

$$C = \{c_i\}, i = \overline{1, 3}.$$

Застосовується наступна процедура вибору траєкторії, яка розв'язує поставлену задачу у декілька етапів.



Рис. 1. Критерії оптимальності при розв'язанні конфліктних ситуацій

Першим етапом є визначення множини безконфліктних траєкторій польоту  $S$  з множини допустимих  $X$ . Траєкторія  $x$  належить до множини  $S$ , якщо при польоті за нею не виникає конфліктних ситуацій:

$$S = \{x \in D_x \mid x \notin \Omega\},$$

де  $\Omega$  – область конфлікту між літаками.

Другим етапом є визначення множини парето-оптимальних альтернатив (траєкторій)  $P$  з множини  $S$ :

$$P = \{x_a \in S \mid C(x_a) \leq C(x_b), a = \overline{1, m}, b = \overline{1, m}\},$$

де  $m$  – кількість альтернативних траєкторій з множини  $S$ . У випадку, якщо множина  $P$  містить лише одну альтернативу, задача вибору оптимальної безконфліктної траєкторії є розв'язаною. У протилежному випадку виконується звуження множини парето-оптимальних альтернатив на третьому етапі розв'язання задачі. Значення критеріїв оптимальності траєкторій з множини  $P$  приводяться до області допустимих значень

$$D_c = \{c \mid c \in [0, 1]\}.$$

Визначення оптимальної траєкторії  $x^*$  з множини парето-оптимальних альтернатив  $P$  здійснюється шляхом знаходження мінімуму цільової функції  $F$ . В якості цільової функції  $F$  використаємо лінійну згортку векторного критерію оптимальності  $C$  [9, 10]. Задача вибору оптимальної траєкторії має вигляд:

$$F(C(x^*), W) = \min_{x \in P} F(C(x), W) = \min_{x \in P} \sum_{i=1}^3 w_i c_i(x), \quad (1)$$

де  $w$  – вагові коефіцієнти, які відображають відносну важливість критеріїв.

Вагові коефіцієнти у сукупності утворюють вектор коефіцієнтів

$$W = \{w_i\}, i = \overline{1, 3}$$

з областю допустимих значень

$$D_w = \left\{ W \mid \sum_{i=1}^3 w_i = 1; w_i > 0, i = \overline{1, 3} \right\}.$$

### Визначення вагових коефіцієнтів важливості критеріїв оптимальності

Для розв'язання задачі вибору оптимальної траєкторії маневрування при усуненні конфлікту недоцільно використовувати способи визначення вагових коефіцієнтів важливості, які базуються на встановленні строгих переваг критеріїв оптимальності, що задаються у числовому вигляді. Це пояснюється тим, що відносна важливість критеріїв залежить від типу та характеристик конкретної конфліктної ситуації між літаками. Пропонується визначати значення вагових коефіцієнтів з урахуванням якісної та кількісної інформації про множини частинних критеріїв оптимальності.

Проведемо аналіз якісної інформації про критерії оптимальності.

Регулярність польотів вважається пріоритетним показником в порівнянні з економічністю. Це обумовлюється тим, що значні відхилення від планової траєкторії польоту можуть зумовити виникнення нових конфліктних ситуацій, перевантажень елементів повітряного простору тощо. Економічність в свою чергу має пріоритет над складністю маневрів, оскільки передбачається, що літаки виконують політ в автоматичному режимі. Тоді критерії оптимальності можна проанжувати в порядку зменшення важливості:

$$c_1 > c_2 > c_3 \Leftrightarrow w_1 \geq w_2 \geq w_3.$$

Область допустимих значень вагових коефіцієнтів  $w$  приймає вигляд:

$$D_w = \left\{ W \mid \sum_{i=1}^3 w_i = 1; w_i \geq w_{i+1}, i = \overline{1, 2}; w_3 \geq w_0 > 0 \right\}, \quad (2)$$

де  $w_0$  – мінімальне значення вагових коефіцієнтів.

Вибір оптимальної траєкторії  $x^*$  з множини парето-оптимальних  $P$  можна розглядати як задачу прийняття рішень в умовах невизначеності, коли значення вагових коефіцієнтів  $w$  не можуть бути чітко визначені з області допустимих  $D_w$ . Тому пропонується визначати точні чисельні значення вагових коефіцієнтів  $w$  для кожної альтернативної траєкторії  $x$  з урахуванням їх залежності від значень частинних критеріїв оптимальності  $c(x)$  та мінімального значення вагових коефіцієнтів  $w_0$ .

Приймаючи обережну стратегію прийняття рішення, вибір оптимальної траєкторії маневрування зводиться до вибору найкращої траєкторії з найгірших. Отже, необхідно визначати значення вагових коефіцієнтів таким чином, щоб значення цільової функції для кожної альтернативи було максимальним.

Вектор вагових коефіцієнтів  $W^*$  для кожної траєкторії  $x$  може бути знайдений в результаті розв'язання задачі лінійного програмування, коли знаходиться максимум функції  $f(W)$ , в якій змінними є вагові коефіцієнти, а значення критеріїв оптимальності є константами, з урахуванням обмежень, визначених областю допустимих значень вагових коефіцієнтів (2):

$$f(W^*) = \max_W f(W) = \max_W \sum_{i=1}^3 w_i c_i(x), \quad (3)$$

де  $\sum_{i=1}^3 w_i = 1, w_i - w_{i+1} \geq 0, i = \overline{1, 2}, w_3 \geq w_0 > 0$ .

Коефіцієнт  $w_0$  характеризує мінімально допустиму важливість критерію складності маневрування і може бути обраний відповідно до типу та характеристик конфліктної ситуації. Допустимі значення коефіцієнту  $w_0$  для згортки трьох критеріїв знаходяться в інтервалі  $w_0 \in (0, 1/3)$ .

Запропонований спосіб визначення вагових кое-

фіцієнтів є універсальним і може застосовуватися для згортки будь-якої кількості критеріїв оптимальності.

Визначення рекомендованих значень коефіцієнту  $w_0$  може бути здійснене експериментально шляхом імітаційного моделювання багатокритеріального вибору траєкторій маневрування літаків для розв'язання всіх типів конфліктів за класифікацією [6] Європейської організації з безпеки авіонавігації EUROCONTROL.

Таким чином, задача визначення оптимальної траєкторії  $x^*$  із множини парето-оптимальних  $\mathbf{P}$  (1) з урахуванням запропонованого способу визначення вагових коефіцієнтів важливості (3) зводиться до такої:

$$F(C(x^*), W^*(x^*)) = \min_{x \in \mathbf{P}} \max_{W \in \mathbf{D}_w} F(C(x), W). \quad (4)$$

## Висновки

В статті запропоновано модель вибору безконфліктної траєкторії польоту з заданої множини за векторним критерієм оптимальності, який характеризує ефективність польоту. Оптимальна безконфліктна траєкторія обирається з множини парето-оптимальних альтернатив за мінімумом цільової функції, яка є лінійною згортою векторного критерію. Визначення вагових коефіцієнтів важливості критеріїв виконується окремо для кожної альтернативної траєкторії шляхом розв'язання задачі лінійного програмування, коли знаходиться максимум цільової функції відносно вектору коефіцієнтів важливості, а значення критеріїв оптимальності є константами. Такий спосіб може бути застосований для будь-якої кількості критеріїв.

Розроблена модель може використовуватися як при створенні нових, так і для оцінки ефективності існуючих оптимізаційних методів розв'язання конфліктних ситуацій у повітряному русі.

Актуальною є задача оптимізації побудови множини можливих безконфліктних траєкторій польоту, з якої виконується вибір раціональної траєкторії за обраними критеріями економічності, регулярності та складності маневрування. Тому розвитком проведених досліджень може бути розробка моделі багатокритеріального послідовного формування безконфліктних траєкторій польоту літаків.

## МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРІАЛЬНОГО ВИБОРА ТРАЄКТОРИЙ МАНЕВРИВАННЯ ПРИ РАЗРЕШЕНИИ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ МЕЖДУ САМОЛЕТАМИ

Д.В. Васильев

*Рассматривается задача многокритериального выбора траекторий маневрирования для разрешения конфликтных ситуаций между самолетами. Разработана модель выбора бесконфликтной траектории из заданного множества возможных траекторий по векторному критерию оптимальности. Предложен способ определения весовых коэффициентов важности при использовании линейной свертки критериев оптимальности.*

*Ключевые слова:* безопасность полетов, разрешение конфликтной ситуации, многокритериальное принятие решений, свертка критериев оптимальности.

## MODEL OF MULTI-OBJECTIVE SELECTION OF TRAJECTORIES FOR AIRCRAFT CONFLICTS RESOLUTION

D.V. Vasylyev

*The problem of multi-objective selection of trajectories for aircraft conflict resolution is considered. The model of conflict-free trajectory selection from defined set of possible trajectories by vector optimality criterion was developed. The method of determining the importance weights for linear convolution of optimality criteria was proposed.*

**Keywords:** flight safety, conflict resolution, multi-objective decision-making, convolution of optimality criteria.

## Список літератури

1. Bicchi A. On Optimal Cooperative Conflict Resolution for Air Traffic Management Systems / A. Bicchi, L. Pallottino // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2000. – Vol. 1, No. 4. – P. 221-232.
2. Goodchild C. Co-operative Optimal Airborne Assurance in Free Flight Airspace / C. Goodchild, M.A. Vilaplana, S. Elefante // *3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Napoli, 13-16 June 2000*.
3. Hu J. Optimal Maneuver for Multiple Aircraft Conflict Resolution: A Braid Point of View / J. Hu, M. Prandini, S. Sastry // *Proc. of the 39th IEEE conf. on decision and control*. – Sydney. – 2000. – Vol. 4. – P. 4164-4169.
4. Menon P.K. Optimal Strategies for Free Flight Air Traffic Conflict Resolution / P.K. Menon, G.D. Sweriduk, B. Sridhar // *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. – 1999. – 22(2). – P. 202-211.
5. Tomlin C.J. Conflict Resolution for Air Traffic Management: A Study in Multiagent Hybrid Systems / C.J. Tomlin, G.J. Pappas, S.S. Sastry // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1998. – Vol. 43 (4). – P. 509-521.
6. Towards a Controller-based Conflict Resolution Tool - A Literature Review. – EUROCONTROL, 2002. – 103 p.
7. Vasylyev D.V. Multiobjective Optimization of Aircraft Conflicts Resolution / D.V. Vasylyev // *The Fifth World Congress "Aviation in the XXI-st Century" – "Safety in Aviation and Space Technologies": September 25-27, 2012.: Proceedings*. – Kyiv: NAU, 2012. – Volume 2. – P. 3.1.15-3.1.17.
8. Васильев Д.В. Застосування методу згортання векторного критерію оптимальності при виборі маневрів літаків з усунення конфліктної ситуації / Д.В. Васильев // *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: наук.-техн. конф., 28-30 листопада 2012 р.: тези доп.* – К.: НАУ, 2012. – С. 52.
9. Кини Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х. Райфа; пер. с англ. под ред. И.Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
10. Лотов А.В. Многокритериальные задачи принятия решений: учебное пособие / А.В. Лотов, И.И. Поспелова. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
11. Таха Хэмди А. Введение в исследование операций, 6-е издание / Хэмди А. Таха; пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 912 с.

Надійшла до редколегії 23.04.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Г. Мелкумян, Національний авіаційний університет, Київ.