

УДК 656.7.084:519.81:519.857(045)

## БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ СИНТЕЗ БЕЗКОНФЛІКТНИХ ТРАЄКТОРІЙ ПОЛЬОТУ ПОВІТРЯНИХ КОРАБЛІВ

*Д. В. Васильєв*, канд. техн. наук

Національний авіаційний університет

dvasyliev@nau.edu.ua

*Розглянуто задачу багатокритеріального синтезу траєкторій польоту для розв'язання конфліктної ситуації між повітряними кораблями. Розроблено метод послідовного синтезу безконфліктних просторово-часових траєкторій польоту із застосуванням багатокритеріального динамічного програмування.*

**Ключові слова:** безпека польотів; розв'язання конфліктної ситуації; багатокритеріальне динамічне програмування.

*The problem of multi-objective synthesis of trajectories for aircraft conflict resolution is considered. The method of sequential conflict-free space-time trajectories synthesis using multi-objective dynamic programming was developed.*

**Keywords:** flight safety; conflict resolution; multi-objective dynamic programming.

### Постановка проблеми

Сьогодні актуальною проблемою є забезпечення безпеки польотів в умовах постійного збільшення їх інтенсивності. Важливим є розв'язання конфліктних ситуацій між повітряними кораблями (ПК), імовірність виникнення яких збільшується у просторі з високою щільністю та динамічністю повітряного руху. Особлива увага приділяється підвищенню рівня автоматизації процесів управління повітряним рухом (УПР) в умовах виникнення конфліктних ситуацій, що дозволяє знизити робоче вантаження диспетчерів та екіпажів.

Сучасні вимоги авіаперевізників до забезпечення високої регулярності та економічності польотів вимагають урахування таких показників під час вибору траєкторій маневрування ПК для усунення потенційних конфліктів.

Таким чином, виникає необхідність розробки якісно нових методів розв'язання конфліктних ситуацій, які повинні враховувати різні критерії ефективності польотів при формуванні програми маневрування ПК та можуть бути реалізовані у автоматизованих системах управління повітряним рухом (АС УПР).

### Аналіз досліджень і публікацій

У більшості відомих оптимізаційних методів розв'язання конфліктних ситуацій [1–4] при пошуку безконфліктних траєкторій ПК враховується один критерій оптимальності, що характеризує ефективність польоту. Однак під час планування складних комбінованих маневрів для усу-

нення конфлікту доцільно враховувати одночасно декілька критеріїв. Крім того, вказані методи сьогодні не знайшли практичного застосування в АС УПР.

Європейська організація з безпеки аеронавігації EUROCONTROL спільно з National Aerospace Laboratory (*the Netherlands*) здійснює розробку системи підтримки прийняття рішень при виявленні та розв'язанні конфліктних ситуацій CORA (*Conflict Resolution Assistant*).

На сьогодні завершено розробку прототипу системи CORA-2, яка зокрема забезпечує автоматичне визначення множини можливих безконфліктних траєкторій польоту ПК та їх ранжування відповідно до дванадцяти заданих критеріїв оптимальності.

Перевагою системи CORA-2 є простота інтегрування у АС УПР. Однак система CORA-2 має декілька істотних недоліків.

По-перше, при побудові безконфліктних траєкторій не розглядаються комбіновані маневри по зміні напрямку, швидкості та висоті польоту, що суттєво звужує можливості для пошуку ефективного рішення для розв'язання конфлікту.

По-друге, застосування методу повного перебору для побудови множини можливих траєкторій маневрування знижує обчислювальну ефективність роботи алгоритму.

По-третє, при оцінюванні ефективності можливих безконфліктних траєкторій не враховується критерій економічності польотів, хоча враховуються такі критерії, які по суті дублюють один одного.

По-четверте, не визначено принцип встановлення значень вагових коефіцієнтів важливості критеріїв оптимальності у згортці [5].

У роботі [6] запропоновано модель вибору безконфліктної траєкторії польоту із заданої множини за векторним критерієм оптимальності, який характеризує ефективність польоту. Оптимальна безконфліктна траєкторія обирається з множини парето-ефективних 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 вектора коефіцієнтів важливості, а значення критеріїв оптимальності є константами.

У даній роботі досліджується запропонована раніше модель. Розглядається задача оптимізації побудови множини парето-ефективних безконфліктних траєкторій польоту, з якої виконується вибір раціональної траєкторії за обраними критеріями оптимальності.

#### Постановка завдання

У статті розглядається задача багатокритеріального синтезу траєкторій польоту для розв'язання потенційної конфліктної ситуації між двома ПК під час польоту. Під конфліктною ситуацією розуміється ситуація, коли відстань між ПК у прогнозований момент їх найбільшого зближення є меншою за безпечну мінімальну відстань (норми ешелонування).

Розв'язання конфліктної ситуації подається як багатокритеріальна задача прийняття рішень, яка полягає у виборі безконфліктних траєкторій польоту з урахуванням декількох критеріїв оптимальності та обмежень. Альтернативами вибору є можливі траєкторії польоту ПК, який здійснює маневрування для усунення конфлікту. Під маневруванням розуміють зміну курсу, швидкості, висоти польоту або їх поєднання. Безумовним обмеженням є безпека польотів, яка забезпечується витриманням норм ешелонування. Критеріями оптимальності, які характеризують ефективність усунення конфлікту, є регулярність польотів  $c_1$ , економічність польотів  $c_2$  та складність маневрування  $c_3$ . Показниками таких критеріїв є відхилення від плану польоту, витрати палива та кількість змін профілю польоту відповідно. Обрані критерії оптимальності утворюють вектор  $C = \{c_i\}, i = \overline{1,3}$ .

Розв'язком конфліктної ситуації є вибір такої просторово-часової траєкторії польоту  $T^*$ , яка забезпечувала б усунення конфлікту та відпові-

дала обраним критеріям оптимальності (мінімальним значенням показників ефективності):

$$T^* = \arg \min_{T \in \Omega} C(T),$$

де  $\Omega$  — множина можливих безконфліктних траєкторій польоту.

Мета статті — розроблення методу послідовного синтезу безконфліктних просторово-часових траєкторій польоту ПК із застосуванням багатокритеріального динамічного програмування.

#### Метод багатокритеріального послідовного синтезу безконфліктних траєкторій польоту

Запобігання потенційного конфлікту розглядається як послідовний багатоетапний процес прийняття рішень у дискретні моменти часу. Задача синтезу безконфліктної траєкторії польоту формулюється таким чином — з множини можливих керувань знайти таке, яке переведе літак з початкового стану (конфлікт виявлено) в кінцевий (вихід із зони УПР) таким чином, що конфліктну ситуацію буде усунено, а показники ефективності польоту набудуть мінімального значення [7].

Розв'язання конфліктної ситуації є керованим процесом, а літак, який здійснює маневрування, є дискретною динамічною системою  $S$ . Таким чином, задача синтезу безконфліктної траєкторії польоту є задачею оптимального керування динамічною системою  $S$ , яка може бути розв'язана із застосуванням методу динамічного програмування [7; 8].

Застосування методу багатокритеріального динамічного програмування дозволяє синтезувати множину парето-ефективних безконфліктних траєкторій польоту  $P$ , з якої здійснюється подальший вибір оптимальної траєкторії  $T^*$  [9; 10].

Розглянемо дискретну динамічну систему  $S$ , яка визначається як сукупність:

$$S = \{D_x, X_0, X_k, D_u(X), D_u^s(X), f(X, U), \Delta J_i(X, U)\},$$

де  $D_x$  — множина станів системи;  $X_0$  — початковий стан;  $X_k$  — кінцевий стан;  $D_u(X)$  — множина можливих керувань  $U$  у стані  $X$ ;  $D_u^s(X)$  — множина безконфліктних керувань  $U$  у стані  $X$ ;  $f(X, U)$  — функція переходу із стану  $X$  під дією керування  $U$ ;  $\Delta J_i(X, U)$  — витрати за кожним  $i$  критерієм оптимальності при переході із стану  $X$  під дією керування  $U$ ,  $i = \overline{1,3}$ .

Вектор стану  $X$  містить координати, висоту, швидкість, курс польоту ПК. Початковий  $X_0$  та кінцевий  $X_k$  стани системи є безконфліктними.

Вектор вхідних керувальних сигналів  $\mathbf{U}$  містить задані значення прискорення, кутів крену та тангажу. На можливі керування накладаються обмеження відповідно до льотно-технічних характеристик ПК, вимог щодо комфортності пасажирів при маневруванні. Такі обмеження визначають множину можливих керувань  $\mathbf{D}_u(\mathbf{X})$  у стані  $\mathbf{X}$ .

Якщо при переході зі стану  $\mathbf{X}$  під дією керування  $\mathbf{U}$  відбувається порушення норм ешелонування, тоді таке керування вважається недопустимим (накладається обмеження за безпекою польотів). У результаті формується множина безконфліктних керувань  $\mathbf{D}_u^s(\mathbf{X})$ .

Для довільної траєкторії  $\mathbf{T} = \{\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_n\}$  значення показників  $J$ , що характеризують ефективність польоту, визначаються таким чином:

$$J_i(\mathbf{T}) = \sum_{j=1}^n \Delta J_i(\mathbf{X}_{j-1}, \mathbf{U}_j).$$

Показники ефективності  $J$  утворюють вектор  $\mathbf{J} = \{J_i\}, i = \overline{1,3}$ .

Під час використання як показників ефективності відхилень від плану польоту, витрат палива та кількості змін профілю польоту забезпечується адитивність витрат  $\Delta J(\mathbf{X}, \mathbf{U})$  при переході між станами.

Для розв'язання задачі синтезу множини парето-ефективних безконфліктних траєкторій польоту може бути застосована пряма або обернена процедура багатокритеріального динамічного програмування. При використанні прямої процедури задача розв'язується послідовно від початкового стану до кінцевого, в разі використання оберненої процедури — навпаки [10].

Для визначення множини парето-ефективних оцінок безконфліктних траєкторій  $\mathbf{E}(\mathbf{X})$  при переході до стану  $\mathbf{X}$ , який слідує безпосередньо за станом  $\mathbf{X}'$ , застосовується рівняння багатокритеріального динамічного програмування [9, 10]:

$$\mathbf{E}(\mathbf{X}) = \text{eff} \bigcup_{\mathbf{X}' \in \Pi} (\mathbf{E}(\mathbf{X}') \oplus \{\Delta J_i(\mathbf{X}', \mathbf{U}')\}), i = \overline{1,3}, \quad (1)$$

де  $\text{eff}$  — оператор знаходження парето-ефективних оцінок;  $\Pi$  — множина станів, що безпосередньо передують стану  $\mathbf{X}$ ;  $\mathbf{U}' \in \mathbf{D}_u^s(\mathbf{X}')$  — керування, що переводить літак зі стану  $\mathbf{X}' \in \Pi$  до стану  $\mathbf{X}$ .

Позначимо  $\mathbf{K}_f$  множину повних безконфліктних траєкторій польоту, за якими літак переходить від початкового стану  $\mathbf{X}_0$  до кінцевого  $\mathbf{X}_k$ . У результаті з урахуванням рівняння (1) множина  $\mathbf{P}$  парето-ефективних безконфліктних траєкторій польоту визначається як:

$$\mathbf{P} = \{\mathbf{T} \in \mathbf{K}_f | \mathbf{J}(\mathbf{T}) \in \mathbf{E}(\mathbf{X}_k)\}.$$

Для визначення множини парето-ефективних оцінок безконфліктних траєкторій  $\mathbf{E}(\mathbf{X})$  при переході із стану  $\mathbf{X}$  застосовується рівняння багатокритеріального динамічного програмування [9; 10]:

$$\mathbf{E}(\mathbf{X}) = \text{eff} \bigcup_{\mathbf{U} \in \mathbf{D}_u^s(\mathbf{X})} (\{\Delta J_i(\mathbf{X}, \mathbf{U})\} \oplus \mathbf{E}(f(\mathbf{X}, \mathbf{U}))), \quad (2)$$

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

де  $\mathbf{E}(f(\mathbf{X}, \mathbf{U}))$  — множина парето-ефективних оцінок заключних безконфліктних траєкторій  $\mathbf{T}' = \{f(\mathbf{X}, \mathbf{U}), \dots, \mathbf{X}_k\}$ .

Позначимо  $\mathbf{K}_r$  множину повних безконфліктних траєкторій польоту, за якими літак переходить від кінцевого стану  $\mathbf{X}_k$  до початкового  $\mathbf{X}_0$ . У результаті з урахуванням рівняння (2) множина  $\mathbf{P}$  парето-ефективних безконфліктних траєкторій польоту визначається як:

$$\mathbf{P} = \{\mathbf{T} \in \mathbf{K}_r | \mathbf{Q}(\mathbf{T}) \in \mathbf{E}(\mathbf{X}_0)\}.$$

Подальший вибір оптимальної безконфліктної траєкторії польоту ПК  $\mathbf{T}^*$  виконується шляхом звуження множини парето-ефективних траєкторій  $\mathbf{P}$  із застосуванням методу згортання векторного критерію оптимальності  $\mathbf{C}$ . Пропонується здійснювати вибір оптимальної траєкторії  $\mathbf{T}^*$  шляхом розв'язання наступної оптимізаційної задачі [6]:

$$\mathbf{T}^* = \arg \min_{\mathbf{T} \in \mathbf{P}} \max_{\mathbf{W} \in \mathbf{D}_w} \sum_{i=1}^3 w_i c_i(\mathbf{T}), \quad (3)$$

де  $c_i$  — критерії оптимальності з областю допустимих значень  $\mathbf{D}_c = \{c | c \in [0, 1]\}$ ;  $w_i$  — вагові коефіцієнти, які відображають відносну важливість критеріїв та в сукупності утворюють вектор  $\mathbf{W} = \{w_i\}, i = \overline{1,3}$  з областю допустимих значень  $\mathbf{D}_w$ .

Задача (3) відповідає обережній стратегії прийняття рішення, коли вибір оптимальної траєкторії зводиться до вибору найкращої траєкторії з найгірших (значення вагових коефіцієнтів визначаються таким чином, щоб значення функції згортки для кожної альтернативи було максимальним).

Значення критеріїв оптимальності траєкторій  $\mathbf{T}$  з множини  $\mathbf{P}$  приводяться до області допустимих значень  $\mathbf{D}_c$  за допомогою додатного лінійного перетворення:

$$c_i(\mathbf{T}) = \frac{J_i(\mathbf{T}) - \min_{\mathbf{T} \in \mathbf{P}} J_i(\mathbf{T})}{\max_{\mathbf{T} \in \mathbf{P}} J_i(\mathbf{T}) - \min_{\mathbf{T} \in \mathbf{P}} J_i(\mathbf{T})},$$

де  $J_i(\mathbf{T})$  — значення показника, що визначає відповідний критерій оптимальності,  $i = \overline{1,3}$ .

Область допустимих значень вагових коефіцієнтів  $\mathbf{D}_w$  визначається з урахуванням того, що обрані критерії оптимальності проранжовані в порядку зменшення важливості, а коефіцієнти не можуть бути меншими заданого параметра  $w_0 > 0$  [6]:

$$c_1 \succ c_2 \succ c_3 \Leftrightarrow w_1 \geq w_2 \geq w_3,$$

$$\mathbf{D}_w = \left\{ \mathbf{W} \left| \sum_{i=1}^3 w_i = 1; w_i \geq w_{i+1}, i = \overline{1,2}; w_3 \geq w_0 > 0 \right. \right\}. \quad (4)$$

Слід зауважити, що екстремальна задача  $\max_{\mathbf{w} \in \mathbf{D}_w} \sum_{i=1}^3 w_i c_i(\mathbf{T})$  для області допустимих значень вагових коефіцієнтів  $\mathbf{D}_w$  виду (4) є задачею лінійного програмування.

### Висновки

У статті розроблено метод багатокритеріального послідовного синтезу безконфліктних траєкторій польоту ПК.

Формування множини парето-ефективних безконфліктних траєкторій польоту виконується із застосуванням багатокритеріального динамічного програмування.

Вибір оптимальної траєкторії з множини парето-ефективних здійснюється із застосуванням методу згортання векторного критерію оптимальності.

Метод може використовуватись як при розробці нових, так і для оцінки ефективності існуючих оптимізаційних методів розв'язання конфліктних ситуацій між ПК.

Розвитком проведених досліджень може бути розробка обчислювального алгоритму методу та дослідження його роботи шляхом комп'ютерного моделювання.

### ЛІТЕРАТУРА

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., Vilaplana M.A., Elefante S.* Cooperative Optimal Airborne Assurance in Free Flight Airspace // 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Napoli, 13–16 June, 2000.
3. *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.
4. *Richards A., How J. P.* Aircraft Trajectory Planning with Collision Avoidance Using Mixed Integer Linear Programming // Proceedings of the 2002 American Control Conference, May 8–10, 2002. — Vol. 3. — P. 1936–1941.
5. *CORA 2 Resolver Final Report.* — EUROCONTROL, 2003. — 107 p.
6. *Васильєв Д. В.* Модель багатокритеріального вибору траєкторій маневрування при розв'язанні конфліктних ситуацій між літаками / Д. В. Васильєв // Системи обробки інформації. — Харків: ХУПС, 2013. — Вип. 4 (111). — С. 85–88.
7. *Васильєв Д. В.* Оптимізація розв'язання конфліктних ситуацій між повітряними кораблями з використанням методу динамічного програмування / Д. В. Васильєв // Проблеми інформатизації та управління. — 2010. — № 2 (30). — С. 46–51.
8. *Харченко В. П.* Розв'язання конфліктних ситуацій між повітряними кораблями маневруванням курсом польоту / В. П. Харченко, Д. В. Васильєв // Вісник НАУ. — 2011. — № 2 (47). — С. 15–20.
9. *Васильєв Д. В.* Застосування багатокритеріального динамічного програмування для оптимізації розв'язання конфліктних ситуацій між літаками / Д. В. Васильєв // XI міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2013»: 21–23 травня 2013 р.: матеріали. — К.: НАУ, 2013. — Т.2. — С. 8.57–8.60.
10. *Коган Д. И.* Динамическое программирование и дискретная многокритериальная оптимизация: учеб. пособие / Д. И. Коган. — Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2005. — 260 с.

Стаття надійшла до редакції 18.12.2013