

УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ РОЗВ'ЯЗАННЯ КОНФЛІКТНИХ СИТУАЦІЙ МІЖ ПОВІТРЯНИМИ КОРАБЛЯМИ

Розглянуто задачу багатокритерійного управління процесами розв'язання конфліктних ситуацій між повітряними кораблями. Визначено вимоги, критерії оптимальності, обмеження та правила розв'язання конфліктів. Розроблено процедуру управління процесами розв'язання конфліктних ситуацій.

Постановка проблеми. Сьогодні модернізація системи організації повітряного руху (ОрПР) спрямована на підвищення пропускну здатності і здійснюється шляхом впровадження новітніх процедур управління повітряним рухом (УПР), розвитку технологій забезпечення безпеки, регулярності та економічності польотів. Особлива увага приділяється підвищенню рівня автоматизації процесів УПР.

При постійному збільшенні інтенсивності польотів важливою є проблема моніторингу повітряної обстановки, виявлення та розв'язання конфліктних ситуацій (КС) між повітряними кораблями (ПК). Актуальним завданням є управління процесами розв'язання КС в умовах високої динамічності відносного руху ПК і жорстких вимог до забезпечення регулярності та економічності польотів. Необхідною є розробка відповідних методів та алгоритмів розв'язання КС між ПК, які можуть бути застосовані у сучасних автоматизованих системах управління повітряним рухом (АС УПР).

Аналіз досліджень і публікацій. Наукові дослідження проблеми моніторингу та розв'язання КС між ПК зосереджені в науково-дослідних центрах NASA (National Agency of Space and Aeronautics, USA), EUROCONTROL (European Organization for the Safety of Air Navigation, Belgium), NLA (National Aerospace Laboratory, the Netherlands).

У відомих методах розв'язання КС [1, 3, 5] вирішується задача усунення конфлікту шляхом зміни курсу польоту та враховується один критерій оптимальності. У методах, які запропоновані в роботах [2, 4], виконується пошук траєкторій маневрування для розв'язання групових конфліктів за векторним критерієм оптимальності, що утворюється з частинних критеріїв, кожен з яких характеризує ефективність маневрування одного ПК. Вказані методи сьогодні не знайшли практичного застосування в АС УПР.

Доцільним є створення методів управління розв'язанням КС, які повинні враховувати одночасно декілька критеріїв оптимальності для кожного ПК, обмеження та правила, що дає змогу підвищити ефективність усунення конфлікту при застосуванні комбінованих маневрів щодо зміни курсу, швидкості та висоти польоту.

Постановка завдання. У статті розглядається задача багатокритерійного управління процесами попарного розв'язання КС між ПК, яка полягає у синтезі безконфліктних траєкторій польоту ПК з урахуванням обраних критеріїв оптимальності та обмежень, а також контролі виконання запропонованих маневрів.

Завданнями дослідження є визначення вимог, критеріїв оптимальності, обмежень та правил розв'язання КС, а також розробка процедури управління процесами розв'язання КС.

Вимоги, критерії оптимальності та обмеження при розв'язанні КС. Ефективність процесу розв'язання КС можна оцінювати за показниками, що характеризують функціонування системи ОрПР у цілому. Сьогодні основними вимогами до системи ОрПР є [8]:

- безпека та регулярність польотів, надійність;
- екологія та ергономіка;
- енергетика та ресурсозбереження;
- доступність повітряного транспорту.

Узагальнено вимоги до ефективності розв'язання КС можуть бути сформульовані у вигляді критеріїв оптимальності та обмежень, відповідно до яких буде виконуватись пошук траєкторій маневрування ПК (рис. 1).

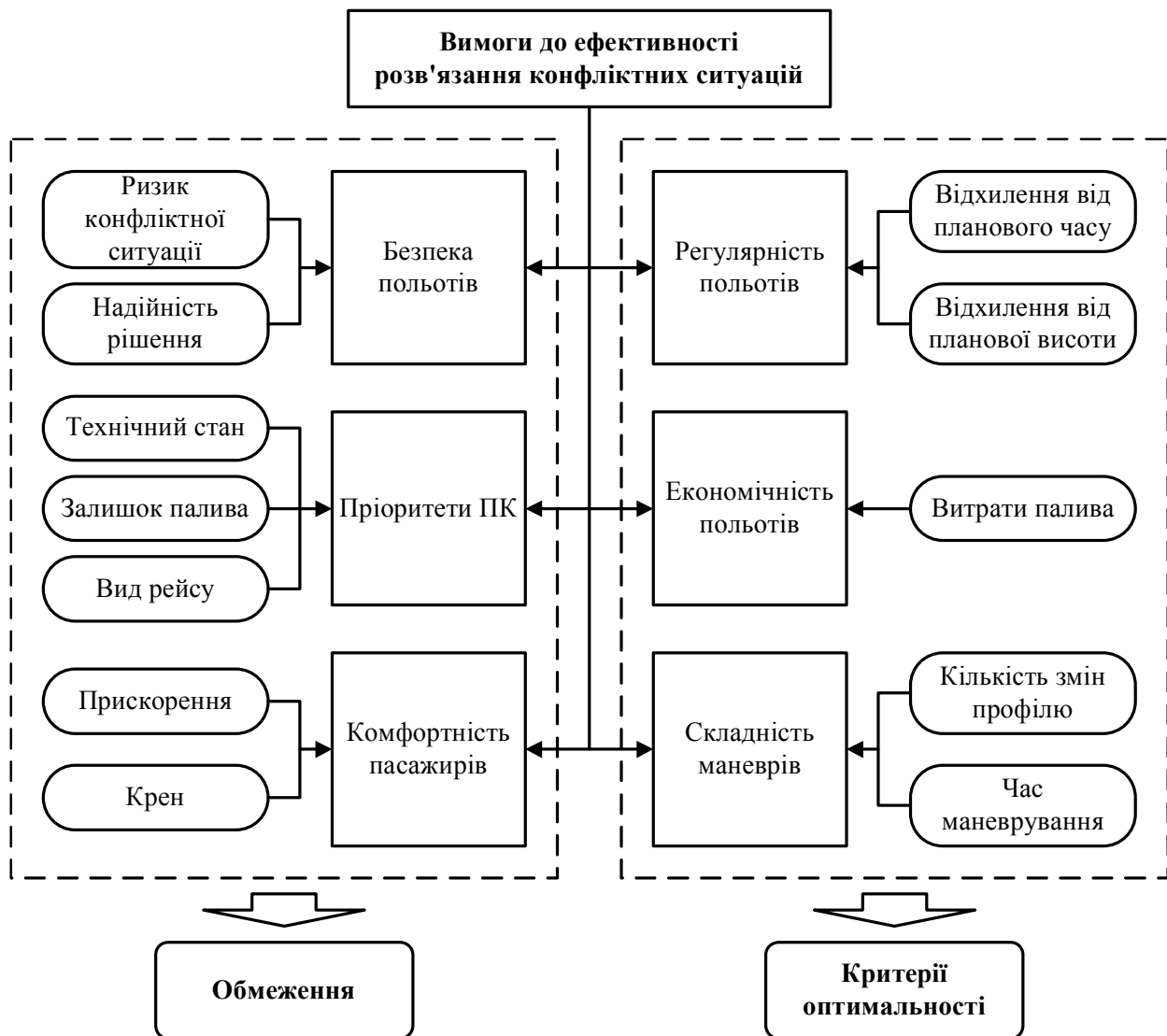


Рис. 1. Вимоги до ефективності розв'язання КС, критерії оптимальності та обмеження

Безпека польотів є безумовною вимогою, яка в першу чергу забезпечується витриманням норм ешелонування. Показником безпеки є ризик виникнення КС. При розв'язанні КС критерії безпеки є обмеженням, яке накладається на можливі керування. Системи розв'язання КС повинні забезпечувати вибір надійного рішення з усунення

конфлікту, тобто синтезувати такі безконфліктні траєкторії польоту, які можуть бути реалізовані ПК.

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.

Регулярність польотів тісно пов'язана з іншими характеристиками. Так значні відхилення від планової траєкторії польоту можуть зумовити виникнення нових КС, перевантажень елементів повітряного простору, підвищення складності УПР, а також збільшення витрат палива.

Важливим критерієм з погляду літаководіння та обслуговування повітряного руху (ОПР) є складність маневрів з усунення КС. Показником складності є кількість змін профілю польоту та тривалість маневрування. Необхідність урахування цього критерію пояснюється тим, що при виконанні складних комбінованих маневрів підвищується робоче навантаження екіпажів і диспетчерів, що призводить до підвищення складності УПР і відповідно до можливого зменшення пропускної здатності органу ОПР у цілому.

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

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

Критерій пріоритетів літаків та критерій комфортності пасажирів доцільно перетворити в обмеження.

У результаті обмеженнями є безпека польотів, надійність рішення, пріоритети літаків, комфортність пасажирів, а критеріями оптимальності – регулярність, економічність та складність маневрування.

Обрані обмеження враховуються на різних етапах розв'язання задачі вибору безконфліктних траєкторій польоту. Безпека польотів є тим обмеженням, яке враховується безпосередньо під час побудови траєкторій маневрування літаків. Надійність рішення з усунення конфлікту забезпечується застосуванням адекватних методів оцінювання ризику виникнення КС та моделей керованого руху ПК. Пріоритети літаків, які визначають можливість виконання маневрів, та критерій комфортності, який накладає обмеження на параметри руху ПК при маневруванні, є вхідними постійними обмеженнями. Також вхідними обмеженнями є: експлуатаційні обмеження за льотно-технічними характеристиками; правила використання повітряного простору; заборона виконувати польоти у зонах небезпечних метеорологічних явищ; правила розв'язання КС.

Правила розв'язання КС. Для підвищення ефективності алгоритмів оптимального вибору маневрів ПК доцільно встановити правила розв'язання КС, до яких належать: правила вибору ПК, який здійснює маневрування, та правила маневрування.

У загальному випадку маневрування може здійснювати як один літак, так і обидва літаки одночасно. Для вибору одного літака пропонується застосовувати такі правила:

1. Маневрування здійснює ПК, який не має пріоритету за обмеженнями (за технічним станом, виконанням літерного або спеціального рейсу, залишком палива).

2. За відсутності пріоритетів маневрування здійснює той ПК, який має поточне відхилення від планової траєкторії польоту.

3. За відсутності пріоритетів та поточних відхилень від плану (або за наявності відхилень в обох ПК) вибір ПК здійснюється відповідно до типу КС (табл. 1). При розробці правил застосовано класифікацію конфліктів між двома ПК [6], запропоновану Європейською організацією з безпеки аеронавігації EUROCONTROL.

Таблиця 1

Правила вибору ПК, який здійснює маневрування залежно від типу конфлікту

Тип конфлікту	Напрямок польоту	Вертикальний профіль		ПК, який маневрує
		ПК №1	ПК №2	
1.1	однаковий	на одному ешелоні		який виконує політ на меншу дальність
1.2	однаковий	набір	на ешелоні	№ 1
1.3	однаковий	зниження	на ешелоні	№ 1
1.4	однаковий	набір	набір	який нижчий від заданого ешелону польоту
1.5	однаковий	набір	зниження	№ 1
1.6	однаковий	зниження	зниження	який вищий від заданого ешелону польоту
2.1	перетин	на одному ешелоні		який виконує політ на меншу дальність
2.2	перетин	набір	на ешелоні	№ 1
2.3	перетин	зниження	на ешелоні	№ 1
2.4	перетин	набір	набір	який нижчий від заданого ешелону польоту
2.5	перетин	набір	зниження	№ 1
2.6	перетин	зниження	зниження	який вищий від заданого ешелону польоту
3.1	зустрічний	на одному ешелоні		який виконує політ на зустрічному ешелоні
3.2	зустрічний	набір	на ешелоні	№ 1
3.3	зустрічний	зниження	на ешелоні	№ 1
3.4	зустрічний	набір	набір	який нижчий від заданого ешелону польоту
3.5	зустрічний	набір	зниження	№ 1
3.6	зустрічний	зниження	зниження	який вищий від заданого ешелону польоту

Можливими маневрами ПК при розв'язанні КС є зміна курсу, швидкості, висоти польоту або їх поєднання. Пропонується застосовувати такі правила усунення конфліктів всіх типів за класифікацією EUROCONTROL (табл. 3), які сформульовані у вигляді обмежень, що накладаються на можливі маневри літаків (табл. 2).

Таблиця 2

Обмеження при маневруванні з усунення конфлікту

Індекс	Зміст обмеження
1	Обом ПК заборонено одночасно здійснювати тільки відвороти, якщо у них однакові маршрути польоту
2	Обом ПК заборонено здійснювати відвороти в однаковому напрямку
3	Обом ПК одночасно заборонено набирати висоту
4	Обом ПК одночасно заборонено знижуватися
5	ПК, що за планом набирає висоту, заборонено знижуватися
6	ПК, що за планом знижується, заборонено набирати висоту
7	Обом ПК одночасно заборонено тільки збільшувати або тільки зменшувати швидкість польоту
8	При зміні тільки швидкостей польоту: ПК, який наздоганяє іншого, заборонено збільшувати швидкість, а ПК, якого наздоганяють, заборонено зменшувати швидкість
9	Обом ПК заборонено одночасно змінювати тільки швидкість польоту
10	Заборонено змінювати тільки швидкість польоту

Таблиця 3

Правила усунення конфліктів між двома ПК

Тип конфлікту	Індекси обмежень	
	Маневрують два ПК	Маневрує один ПК
1.1	1; 2; 3; 4; 7; 8	8
2.1	2; 3; 4; 7	–
3.1	2; 3; 4; 7; 9	10
1.2, 2.2	2; 4; 3, якщо для ПК № 1 ешелон польоту ПК № 2 не задано; 5 для ПК1; 7	5
3.2	2; 3; 4; 5 для ПК № 1; 7	
1.4, 2.4, 3.4	2; 4; 5; 7	
1.3, 2.3	2; 3; 4, якщо для ПК № 1 ешелон польоту ПК № 2 не задано; 6 для ПК № 1; 7	6
3.3	2; 3; 4; 6 для ПК № 1; 7	
1.5, 2.5, 3.5	2; 3; 4; 5 для ПК № 1; 6 для ПК № 2; 7	
1.6, 2.6, 3.6	2; 3; 6; 7	

Процедура управління процесами розв'язання КС. Головною задачею, яка вирішується при управлінні розв'язанням КС, є багатокритерійний вибір траєкторії маневрування ПК. Альтернативами вибору X є набір траєкторій польоту одного ПК, який здійснює маневрування, або комбінації траєкторій двох ПК, які одночасно здійснюють маневрування з усунення конфлікту.

Задача пошуку оптимальної траєкторії формулюється таким чином: з множини можливих траєкторій X знайти таку траєкторію (комбінацію траєкторій) x^* , яка забезпечує усунення КС та відповідає критеріям регулярності c_1 , економічності c_2 і складності маневрування c_3 (мінімальним відхиленням від плану польоту, витратам палива і мінімальній складності маневрування).

Пропонується застосовувати таку процедуру управління процесами розв'язання КС:

1. Визначення типу КС за класифікацією EUROCONTROL та її характеристик.
2. Визначення одного ПК, який буде здійснювати маневрування для усунення конфлікту, відповідно до розроблених правил або прийняття рішення про одночасне маневрування двох ПК.
3. Визначення множини допустимих траєкторій маневрування X відповідно до визначених обмежень та правил розв'язання КС.
4. Визначення множини безконфліктних траєкторій польоту S з множини допустимих X . Траєкторія x належить до множини S , якщо при польоті за нею не виникає КС:

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

де Ω – область конфлікту між ПК.

5. Визначення множини парето-ефективних траєкторій P з множини S .
6. Визначення оптимальної траєкторії (комбінації траєкторій) x^* з множини парето-ефективних P із застосуванням згортки векторного критерію [7]:

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

де $C = \{c_i\}, i = \overline{1,3}$ – вектор критеріїв оптимальності з областю допустимих значень

$D_c = \{c \mid c \in [0,1]\}$; $W = \{w_i\}, i = \overline{1,3}$ – вектор вагових коефіцієнтів важливості критеріїв з

областю допустимих значень $D_w = \left\{ W \mid \sum_{i=1}^3 w_i = 1; w_i \geq w_{i+1}, i = \overline{1,2}; w_3 \geq w_0 > 0 \right\}$; w_0 –

мінімальне значення вагових коефіцієнтів.

7. Контроль виконання літаками обраних маневрів.

При виявленні відхилень від обраних безконфліктних траєкторій польоту, що можуть призвести до виникнення нових КС, виконується коригування програми маневрування із застосуванням розробленої процедури.

Висновки. В умовах постійного збільшення інтенсивності польотів значно зростає необхідність і роль систем підтримки прийняття рішень з якісно новими властивостями, які повинні забезпечувати своєчасне виявлення і розв'язання КС. Для збереження ефективності повітряного руху розв'язання КС необхідно проводити оптимальним

способом, тобто визначати оптимальні маневри з усунення конфлікту між ПК відповідно до таких обраних критеріїв, як регулярність, економічність, складність маневрування, комфортність польоту тощо.

У статті визначено вимоги до ефективності розв'язання КС між ПК, відповідні критерії оптимальності та обмеження, які необхідно враховувати при виборі безконфліктних траєкторій польоту, а також розроблено правила розв'язання всіх типів конфліктів за класифікацією Європейської організації з безпеки аеронавігації EUROCONTROL.

Також розроблено процедуру управління процесами розв'язання КС, яка дозволяє виконати багатокритерійний вибір траєкторій маневрування ПК відповідно до визначених критеріїв оптимальності, обмежень та правил. Оптимальна безконфліктна траєкторія обирається з множини парето-ефективних альтернатив за мінімумом цільової функції, яка є згорткою векторного критерію.

Запропонована процедура управління процесами розв'язання КС універсальна і може бути застосована для створення систем підтримки прийняття при УПР в умовах виникнення конфліктів. Розвитком проведених досліджень може бути розробка моделі багатокритерійного послідовного формування безконфліктних траєкторій польоту ПК.

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. Васильев Д. В. Вибір траєкторій маневрування літаків для усунення конфліктної ситуації за векторним критерієм оптимальності / Д. В. Васильев // Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки : IX міжнар. наук.-техн. конф., 17–18 квітня 2013 р. : збірка доп. – К. : НТУУ «КПІ», 2013. – С. 166–171.
8. Технологическая платформа «Авиационная мобильность и авиационные технологии» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.aviatp.ru/upload/iblock/6f1/present_05.04.2011.pdf.

Подано 17.06.13

Д. В. Васильев

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ
МЕЖДУ ВОЗДУШНЫМИ СУДАМИ**

Рассмотрена задача многокритериального управления процессами разрешения конфликтных ситуаций между воздушными судами. Определены требования, критерии оптимальности, ограничения и правила разрешения конфликтов. Разработана процедура управления процессами разрешения конфликтных ситуаций.

D. V. Vasyliev

CONTROL OF AIRCRAFT CONFLICTS RESOLUTION PROCESSES

The problem of multi-objective control the aircraft conflicts resolution processes is considered. The requirements, optimality criteria, limitations and rules of conflicts resolution were determined. The procedure of conflict resolution control was developed.