

УДК 656.7.084:519.81(045)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА ТРАЕКТОРИЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПРИ РАЗРЕШЕНИИ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ

В.П. ХАРЧЕНКО, Д.В. ВАСИЛЬЕВ

Проведено исследование процедуры многокритериального выбора бесконфликтных траекторий полета при разрешении конфликтной ситуации между воздушными судами.

Ключевые слова: безопасность полетов, многокритериальная оптимизация, конфликтная ситуация.

Введение

Современное развитие авиатранспортной системы характеризуется постоянным увеличением интенсивности полетов. В связи с этим модернизация системы организации воздушного движения в первую очередь направлена на увеличение пропускной способности. Однако в условиях высокой плотности и динамичности воздушного движения увеличивается вероятность возникновения конфликтных ситуаций между воздушными судами (ВС).

Актуальной проблемой является разработка методов поддержки принятия решений при управлении воздушным движением в условиях возникновения конфликтных ситуаций [1; 6]. Высокие требования к регулярности и экономичности полетов обуславливают необходимость учета этих показателей при выборе траекторий маневрирования ВС.

В большинстве известных оптимизационных методов разрешения конфликтных ситуаций [2-5; 7] при поиске бесконфликтных траекторий ВС учитывается один критерий оптимальности, характеризующий эффективность полета. Однако при планировании комбинированных маневров по изменению курса, скорости, высоты полета ВС для разрешения конфликта целесообразно учитывать одновременно несколько критериев оптимальности.

Таким образом, разрешение конфликтной ситуации является многокритериальной задачей принятия решений, которая заключается в выборе бесконфликтных пространственно-временных траекторий ВС с учетом нескольких критериев оптимальности, характеризующих эффективность полета, и ограничений.

Решение такой задачи целесообразно находить путем выбора оптимальной траектории маневрирования из множества парето-оптимальных бесконфликтных траекторий полета. Для сужения множества парето-оптимальных альтернатив могут применяться различные методы [10]. Метод выделения главного критерия сложен в применении в связи с трудностью определения пороговых значений для остальных критериев. Применение метода лексикографического упорядочения критериев нецелесообразно, так как во многих случаях решение находится после оптимизации по первому критерию. Поэтому предлагается использовать метод свертывания векторного критерия оптимальности, что позволяет учитывать качественную и количественную информацию о частных критериях оптимальности.

В статье исследуется процедура последовательного многокритериального выбора бесконфликтной траектории из заданного множества возможных траекторий полета при попарном разрешении конфликтных ситуаций между ВС.

Процедура многокритериального выбора траекторий маневрирования

Для осуществления многокритериального выбора траекторий маневрирования задаются альтернативы выбора, критерии оптимальности и ограничения.

Альтернативой выбора являются набор траекторий полета одного ВС, которое осуществляется маневрирование, или комбинации траекторий двух ВС, которые одновременно осуществляют маневрирование по устранению конфликта. Под маневрированием понимают изменение курса, скорости, высоты полета или их сочетание.

Множество возможных траекторий формируется с учетом различных ограничений, таких как: летно-технические характеристики ВС; правила использования воздушного пространства; запрет выполнения полетов в зонах опасных метеорологических явлений; правила разрешения конфликтных ситуаций; приоритеты самолетов; ограничения по комфортности пассажиров при маневрировании.

Все ограничения определяют множество допустимых траекторий \mathbf{D}_u , из которого необходимо выбрать бесконфликтную и оптимальную траекторию по заданным критериям. Обозначим множество возможных траекторий (комбинаций траекторий) $\mathbf{U} = \{u_j\}$, $u_j \in \mathbf{D}_u$, $j = \overline{1, n}$.

Безусловный критерий - это безопасность полетов, которая обеспечивается выдерживанием норм эшелонирования. Таким образом, критерий безопасности полетов превращается в ограничение.

Оптимизация выбора траектории маневрирования выполняется по критериям регулярности c_1 , экономичности c_2 и сложности маневрирования c_3 , которые образуют вектор критериев $\mathbf{C} = \{c_i\}$, $i = \overline{1, 3}$.

Значение критерия регулярности c_1 определяется отклонением от плана полета, значение критерия экономичности c_2 определяется расходом топлива, а значение критерия сложности маневрирования c_3 – количеством изменений профиля полета ВС.

Таким образом, задача выбора оптимальной траектории формулируется следующим образом: из множества траекторий $\mathbf{U} \in \mathbf{D}_u$ найти такую траекторию u^* , которая обеспечивает устранение конфликтной ситуации и соответствует критериям регулярности, экономичности и сложности маневрирования (минимальным отклонениям от плана полета, расходу топлива и минимальной сложности маневрирования).

Применяется следующая процедура выбора траектории маневрирования:

1. Определение множества бесконфликтных траекторий полета \mathbf{S} из множества допустимых \mathbf{U} .
2. Определение множества парето-оптимальных альтернатив (траекторий) \mathbf{P} из множества \mathbf{S} .
3. Приведение значений критериев оптимальности траекторий из множества \mathbf{P} к области допустимых значений $\mathbf{D}_c = \{c \mid c \in [0, 1]\}$ с помощью положительного линейного преобразования.
4. Выбор оптимальной траектории u^* из множества парето-оптимальных \mathbf{P} .

Сужение множества парето-оптимальных траекторий \mathbf{P} выполняется с использованием метода линейного свертывания векторного критерия оптимальности \mathbf{C} [10]. В общем виде задача выбора оптимальной траектории имеет вид

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

где w – весовые коэффициенты, которые отображают относительную важность критериев и в совокупности образуют вектор $\mathbf{W} = \{w_i\}$, $i = \overline{1, 3}$ с областью допустимых значений \mathbf{D}_w .

Выбор оптимальной траектории u^* рассматривается как задача принятия решений в условиях неопределенности: альтернативами являются траектории $u \in \mathbf{P}$, а неопределенными состояниями – возможные значения вектора весовых коэффициентов $\mathbf{W} \in \mathbf{D}_w$.

Без учета качественной информации о критериях оптимальности область допустимых значений весовых коэффициентов определяется в предположении, что коэффициенты не могут принимать значения меньше заданного параметра $w_0 > 0$

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

Выбор траектории u^* без учета качественной информации о критериях оптимальности предлагается выполнять с помощью минимаксного критерия [8]

$$\min_{u \in P} \max_{W \in D_w} F(C(u), W). \quad (3)$$

Выполним анализ качественной информации о критериях оптимальности для их упорядочения по важности. Регулярность полетов считается приоритетным показателем по сравнению с экономичностью. Экономичность в свою очередь имеет приоритет над сложностью маневров. Тогда критерии оптимальности можно проранжировать в порядке убывания важности

$$c_1 \succ c_2 \succ c_3.$$

Область допустимых значений весовых коэффициентов принимает вид [8]

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

Для решения задачи выбора траектории u^* с учетом выполненного ранжирования критериев оптимальности по важности предлагается использовать критерий Гурвица [11]. Тогда экстремальная задача (1) принимает вид

$$\min_{u \in P} \left(\alpha \min_{W \in D_w} F(C(u), W) + (1 - \alpha) \max_{W \in D_w} F(C(u), W) \right), \quad (5)$$

где $\alpha \in [0,1]$ – показатель оптимизма.

Следует отметить, что экстремальные задачи $\min_{W \in D_w} F(C(u), W)$ и $\max_{W \in D_w} F(C(u), W)$ для области допустимых значений весовых коэффициентов вида (2) или (4) при заданном значении параметра w_0 , который характеризует минимально допустимую важность критериев оптимальности, являются задачами линейного программирования [8].

Компьютерное моделирование

Исследование предложенной процедуры выбора траекторий маневрирования проведено с использованием компьютерного моделирования.

Моделировалась конфликтная ситуация, возникающая между двумя ВС, которые выполняют полет с постоянной скоростью на одном эшелоне по пересекающимся трассам. Задавалось значение горизонтальной нормы эшелонирования $d_s = 20$ км.

Принималось, что для устранения конфликта маневрирует первое ВС. Второе ВС выполняет полет по плановой траектории.

Начальные параметры полета ВС и характеристики прогнозируемой конфликтной ситуации представлены в табл. 1.

Принималось, что первое ВС для устранения конфликта может изменить маршрут полета до контрольного пункта, проложив его через заданные точки пути типа Fly By (выход на следующий участок маршрута выполняется с линейным упреждением разворота). Для моделирования определено 16 таких точек. То есть ВС может выполнять полет до контрольного пункта по нескольким альтернативным маршрутам (рис. 1). При полете от одной точки пути к другой ВС может либо не изменять скорость полета, либо увеличивать или уменьшать скорость на 18 км/ч (5 м/с). Так от начальной точки 0 до точки 3 может быть построено три траектории, до точки 8 – девять траекторий, а до точки 7 – восемнадцать. Таким образом, множество возможных пространственно-временных траекторий первого ВС формируется из комбинаций возможных маневров по изменению курса и скорости полета.

Таблица 1

Параметры полета ВС и характеристики прогнозируемой конфликтной ситуации

| Параметр | ВС 1 | ВС 2 |
|---|---------|---------|
| Курс φ , градусов | 0 | 82 |
| Крейсерская скорость V , км/ч | 830 | 815 |
| Начальные координаты $(x_0; y_0)$, км | (65; 0) | (0; 40) |
| Расстояние до контрольного пункта L , км | 102 | – |
| Плановое время пролета контрольного пункта t_p , с | 442 | – |
| Время полета до наибольшего сближения ВС $t_{\min 0}$, с | 251 | |
| Прогнозируемое минимальное расстояние между ВС $d_{\min 0}$, м | 13245 | |

Моделирование траекторий полета выполнялось с использованием кинематико-энергетической модели управляемого движения самолета [9], которая учитывает динамические свойства движения, летно-технические характеристики различных типов ВС, содержащиеся в базе данных EUROCONTROL Base of Aircraft Data (BADA), и позволяет определять расход топлива. Для моделирования выбран самолет Boeing 737-800 массой 60 тонн, эшелон полета 33000 футов. Траекторное управление моделировалось для режимов стабилизации заданной скорости полета и бокового отклонения от линии пути.

Для каждой траектории определены: минимальное расстояние между ВС d_{\min} , отклонение от планового времени пролета контрольного пункта маршрута ΔT , расход топлива q и количество изменений профиля полета k .

Решалась задача выбора оптимальной траектории (3) и задача (5) для трех значений показателя оптимизации: $\alpha_1=0$ – соответствует применению минимаксного критерия; $\alpha_2=0,5$ – состояние неопределенности; $\alpha_3=1$ – максимизация. Минимальное значение весовых коэффициентов важности критериев задавалось $w_0=0,1$.

В результате моделирования многокритериального выбора траектории последовательно определены:

- множество **S** из 213 бесконфликтных траекторий полета (для которых выполняются условие выдерживания нормы эшелонирования d_s);
- множество **P** из 27 парето-оптимальных траекторий;
- значения критериев оптимальности для траекторий из множества **P**;
- оптимальные бесконфликтные траектории полета первого ВС (без учета и с учетом качественной информации о критериях оптимальности).

На рис. 2 в пространственно-временной системе координат $x \times x \times t$ изображены парето-оптимальные бесконфликтные траектории и плановая траектория полета первого ВС. Множество парето-оптимальных траекторий **P** характеризуется следующими показателями: минимальное и максимальное абсолютные отклонения от планового времени полета составляют $\Delta T_{\min}=0$ с, $\Delta T_{\max}=12,6$ с соответственно; минимальное и максимальное увеличения расхода топлива по сравнению с плановой траекторией $\Delta q_{\min}=2,4\%$, $\Delta q_{\max}=7,7\%$; максимальное и минимальное количество изменений профиля полета $k_{\min}=3$, $k_{\max}=9$.

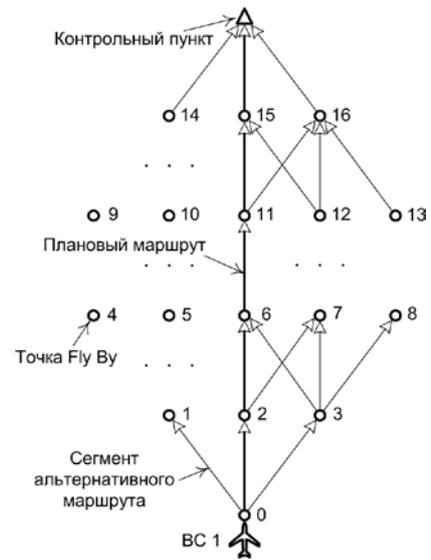


Рис. 1. Построение множества траекторий маневрирования

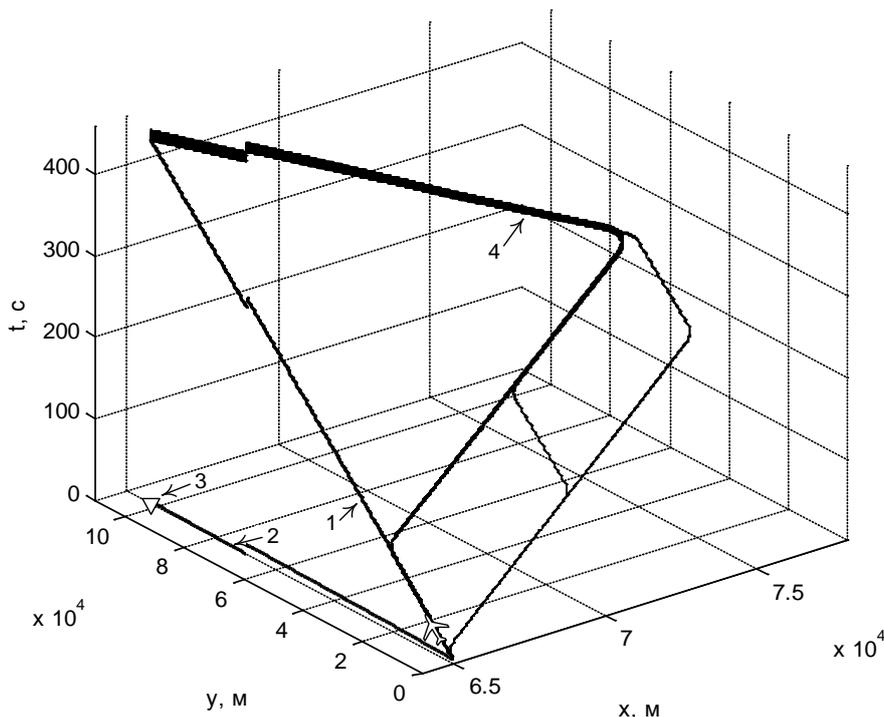


Рис. 2. Множество парето-оптимальных траекторий полета первого ВС в пространственно-временной системе координат:

- 1 – плановая траектория; 2 – плановая траектория в пространственной системе координат;
- 3 – контрольный пункт на маршруте; 4 – парето-оптимальные бесконфликтные траектории

Значения критериев оптимальности для парето-оптимальных траекторий представлены на рис. 3. Значения целевой функции $f_0 = \max_{w \in D_w} F$ для области D_w вида (2) и функции

$f_r = \alpha \min_{w \in D_w} F + (1 - \alpha) \max_{w \in D_w} F$ для области D_w вида (4) представлены на рис. 4.

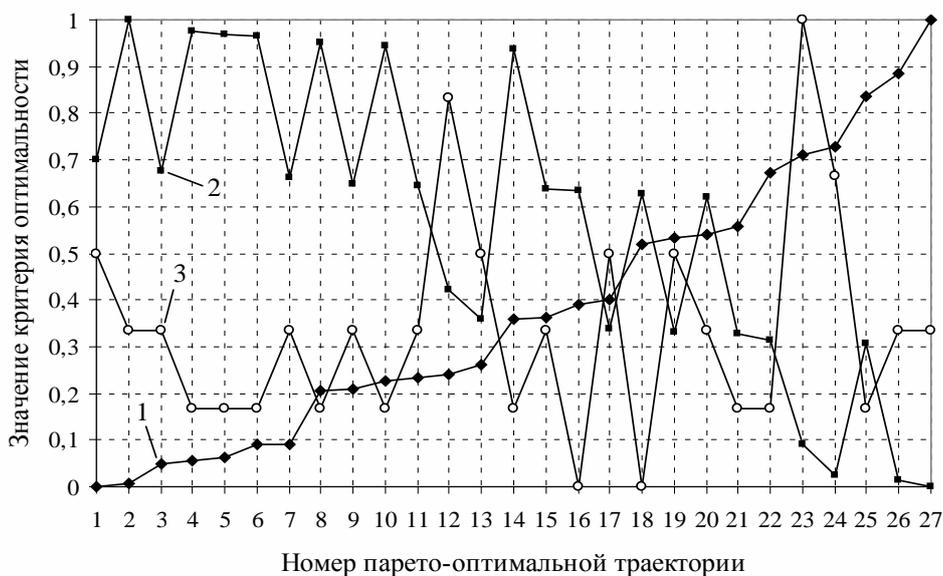


Рис. 3. Значения критериев оптимальности: 1 – критерий регулярности s_1 ; 2 – критерий экономичности s_2 ; 3 – критерий сложности маневрирования s_3

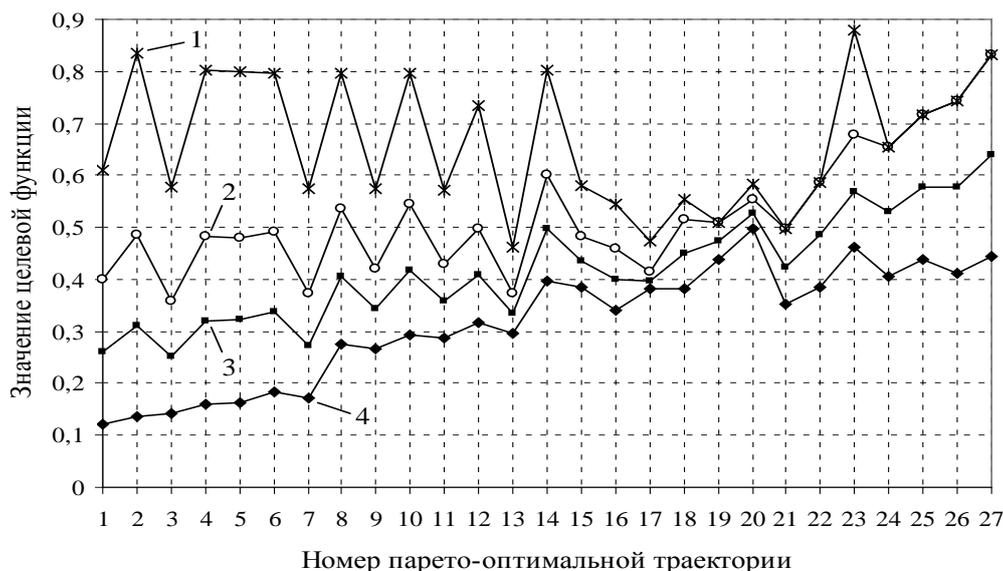


Рис. 4. Значения целевой функции:

1 – f_0 ; 2 – f_r при $\alpha_1=0$; 3 – f_r при $\alpha_2=0,5$; 4 – f_r при $\alpha_3=1$

Параметры оптимальных бесконфликтных траекторий полета первого ВС, которые выбраны по минимуму соответствующих целевых функций, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры оптимальных бесконфликтных траекторий полета

| Параметр | Без учета качественной информации о критериях | С учетом качественной информации о критериях | | |
|---|---|--|-----|--------|
| | | 0 | 0,5 | 1 |
| Показатель оптимизма α | – | 0 | 0,5 | 1 |
| № парето-оптимальной траектории | 13 | 3 | | 1 |
| Длина траектории L , м | 105297 | 105270 | | 105396 |
| Минимальное расстояние между ВС d_{\min} , м | 20906 | 20975 | | 20891 |
| Отклонение от планового времени полета Δt_p , с | 3,3 | -0,7 | | 0 |
| Дополнительный расход топлива Δq , % | 4,3 | 5,9 | | 6,1 |
| Количество изменений профиля k | 6 | 5 | | 6 |

Траектория № 1 предполагает выполнение полета: от точки 0 до точки 3 (рис. 1) с увеличением скорости до 848 км/ч; до точки 8 с увеличением скорости до 866 км/ч; далее через точку 13 до точки 16 без изменения скорости; от точки 16 до контрольного пункта с уменьшением скорости до 848 км/ч.

Траектория № 3 предполагает выполнение полета: от точки 0 до точки 2 с увеличением скорости до 848 км/ч; до точки 7 с увеличением скорости до 866 км/ч; далее через точку 13 до точки 16 без изменения скорости; от точки 16 до контрольного пункта с уменьшением скорости до 848 км/ч.

Траектория № 13 предполагает выполнение полета: от точки 0 до точки 2 с увеличением скорости до 848 км/ч; до точки 7 с увеличением скорости до 866 км/ч; далее до точки 13 без изменения скорости; до точки 16 с уменьшением скорости до 848 км/ч; до контрольного пункта с уменьшением скорости до 830 км/ч.

Траектории полета, выбранные с учетом качественной информации о критериях оптимальности, графически представлены на рис. 5. На рис. 5а изображены плановые траектории полета

двух ВС, выбранная оптимальная траектория маневрирования первого ВС для значений показателя оптимизма $\alpha_1=0$ и $\alpha_2=0,5$, а также минимальные расстояния между самолетами при обнаружении $d_{\min 0}$ и устранении конфликта d_{\min} . На рис. 5б представлены аналогичные результаты для показателя оптимизма $\alpha_3=1$.

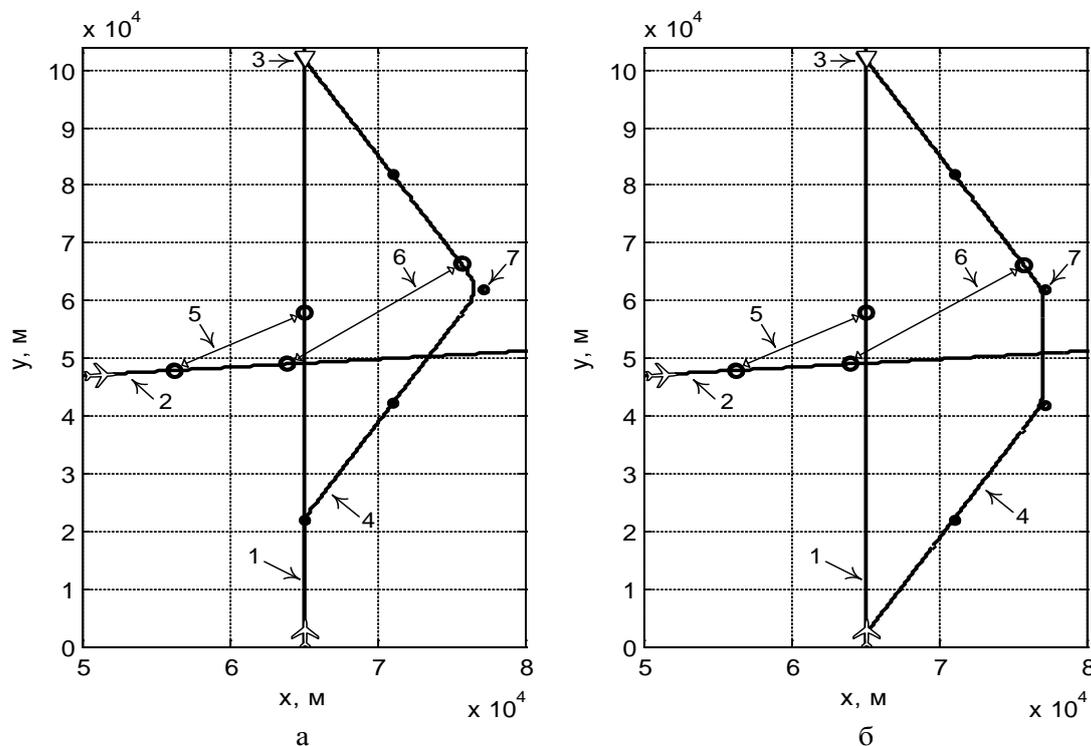


Рис. 5. Оптимальные траектории полета ВС при разрешении конфликтной ситуации: 1 – плановая траектория полета первого ВС; 2 – плановая траектория полета второго ВС; 3 – контрольный пункт; 4 – оптимальная бесконфликтная траектория первого ВС; 5 – минимальное расстояние между ВС при обнаружении конфликта; 6 – минимальное расстояние между ВС при устранении конфликта; 7 – точка пути типа Fly By

Выводы

В статье разработана процедура последовательного многокритериального выбора бесконфликтной траектории полета из заданного множества возможных траекторий маневрирования ВС при разрешении конфликтной ситуации. Выбор оптимальной траектории полета из множества парето-оптимальных альтернатив выполняется с использованием метода свертывания векторного критерия. Особенностью процедуры является то, что сужение множества парето-оптимальных траекторий рассматривается как задача принятия решений в условиях неопределенности, в которой траектории полета являются альтернативами, а значения вектора весовых коэффициентов целевой функции – неопределенными состояниями.

Исследование разработанной процедуры выполнено путем компьютерного моделирования многокритериального выбора бесконфликтной траектории полета при разрешении типовой конфликтной ситуации между ВС. Результаты моделирования свидетельствуют о целесообразности применения процедуры для удовлетворения жестких требований к регулярности и экономичности полетов.

Процедура может использоваться как при разработке новых, так и для оценки эффективности существующих оптимизационных методов разрешения конфликтных ситуаций между ВС.

ЛІТЕРАТУРА

1. Babak V., Kharchenko V., Vasylyev V. Methods of conflict probability estimation and decision making for air traffic management // Aviation. – Vilnius: Technika. – 2006. – Vol. 10, № 1. – P. 3-9.
2. Bicchi A., Pallottino L. On Optimal Cooperative Conflict Resolution for Air Traffic Management Systems // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2000. – Vol. 1, No. 4. – P. 221-232.
3. Blin K., Bonnans J.F., Hoffman E., Zeghal K. Conflict Resolution in Presence of Uncertainty: A Case Study of Decision Making with Dynamic Programming // Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Montreal, August 2001.
4. Goodchild C., Vilaplana M.A., Elefante S. Co-operative Optimal Airborne Assurance in Free Flight Airspace // 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Napoli, 13-16 June 2000.
5. 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.
6. Kharchenko V.P., Vasylyev V.M. Using Intelligent System for Decision Support in Air Traffic Management // The World Congress «Aviation in the XXI-st Century». – Kyiv, 2003. – P. 5.47-5.52.
7. 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.
8. Васильев Д.В. Модель багатокритеріального вибору траєкторій маневрування при розв'язанні конфліктних ситуацій між літаками // Системи обробки інформації: зб. наук. праць. – Харків: ХУ ПС, 2013. - Вип. 4 (111). - С. 85 – 88.
9. Васильев Д.В., Васильев В.М. Дослідження математичної моделі руху літаків для оптимального розв'язання конфліктних ситуацій // Системи обробки інформації: зб. наук. праць. – Харків: ХУ ПС, 2012. - Вип. 7(105). - С. 55 – 59.
10. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений: учеб. пособие. - М.: МАКС Пресс, 2008.
11. Таха Хэмди А. Введение в исследование операций. - 6-е изд. / пер. с англ. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2001.

ANALYSIS THE PROCEDURE OF MULTI-OBJECTIVE AIRCRAFT TRAJECTORIES SELECTION AT CONFLICT RESOLUTION

Kharchenko V.P., Vasylyev D.V.

Analysis the procedure of multi-objective selection of conflict-free trajectories at aircraft conflict resolution was performed.

Key words: flight safety, multi-objective optimization, conflict situation.

Сведения об авторах

Харченко Владимир Петрович, 1943 г.р., окончил КИИГА (1967), доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, проректор по научной работе НАУ (г. Киев, Украина), заведующий кафедрой аэронавигационных систем НАУ, автор более 400 научных работ, область научных интересов – аэрокосмическая информатика, социотехнические системы, принятие решений в условиях неопределенности и риска.

Васильев Денис Владимирович, 1987 г.р., окончил НАУ (г. Киев, Украина) (2010), аспирант НАУ, автор 20 научных работ, область научных интересов – ситуационный анализ и принятие решений в системе организации воздушного движения.