

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ АЭРОНАВИГАЦИИ**

---



***НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК  
«НИИ АЭРОНАВИГАЦИИ»***

**№ 12**

**РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

**Москва 2013**

УДК 656.7.052 (075.8)

## ЗАДАЧА ОБНАРУЖЕНИЯ И РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

*Кандидат технических наук, доцент Кумков С.И., доктор технических наук,  
профессор Пятко С.Г.*

Рассматривается применение методов теории оптимального управления к задаче обнаружения и разрешения конфликтных ситуаций (КС, т.е. опасных сближений или столкновений двух воздушных судов) при УВД. Движение каждого воздушного судна (ВС) в пространстве описывается стандартной системой дифференциальных уравнений пятого порядка. Информация о параметрах движения ВС полагается полностью известной и точной. Обнаружение конфликтной ситуации между судами и расчет её параметров осуществляется по прогнозу их движения. По данной информации одно ВС выбирается для выполнения разрешающего маневра, а второе ВС продолжает движение и не участвует в разрешении КС. В конструктивной форме находятся необходимые и достаточные условия существования разрешающего маневра в горизонтальной или вертикальной плоскости. Параметры разрешающего маневра и его элементы рассчитываются в соответствии с требованиями правил и нормативных документов по УВД.

**Ключевые слова:** воздушное судно, конфликтная ситуация, обнаружение, разрешение, алгоритмы.

## PROBLEM OF DETECTING AND RESOLVING THE CONFLICT SITUATIONS IN AUTOMATED AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEM

*Dr., Associate Prof., Senior research scientist S.I. Kumkov,  
Dr. Sci. Tech., professor S.G. Pyatko*

Problem of detecting and resolving the conflict situations in automated air traffic control system is considered. The problem is solved on the basis of applied methods of the optimal control theory. The conflict situation between two aircrafts is detected by the forecast of their motion. Necessary and sufficient conditions for existence of the resolving maneuver (in horizontal or vertical plane) are found in the constructive form. Parameters of the time-optimal maneuver for resolving the situation and returning the aircraft onto its prescribed airway are computed in accordance with the Official Rules and Regulation Documents on the air traffic control.

**Keywords:** aircraft, conflict situation, detecting, resolving, control, algorithms.

### Введение и формулировка задачи

Задача разработки алгоритмов обнаружения конфликтных ситуаций между воздушными судами, схем и маневров их разрешения является чрезвычайно важной для обеспечения безопасности воздушного движения.

Рассмотрение существующих постановок таких задач показывает, что анализ КС и маневры, рекомендуемые для ее разрешения [1; 2; 6], оказываются весьма приближенными, как вследствие многокритериальности практических задач, так и по техническим причинам их реализации. Попытки строгих математических постановок этой задачи (например, [3; 4] и дальнейшие работы данной группы авторов) могут давать решения, не только далекие от практического использования, но и требующие для своей реализации серьезных изменений в идеологии организации воздушного пространства.

Для гарантированного разрешения КС нужны алгоритмы и процедуры, учитывающие требования Правил и Нормативных документов по УВД [5–7]. Такие алгоритмы должны быть конструктивными, т.е. прямо по анализу КС и построению разрешающего маневра, выявлять условия его существования и обеспечивать как *безопасное эшелонирование* между конфликтующими судами, так и их *последующее возвращение* на заданные трассы.

Пространственное движение каждого ВС описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, стандартизованной для навигационных расчетов [10]. Скорость ВС полагается постоянной и известной. Полагается, что первоначально каждое из ВС движется по оси своей трассы.

Обнаружение конфликтной ситуации между двумя ВС и расчет её параметров осуществляется по прогнозу их движения. На основании этой информации выбирается схема разрешающего маневра и рассчитываются его параметры. В случае существования, такой маневр по построению гарантированно обеспечивает требуемое безопасное расстояние на всем интервале времени сближения, расхождения судов и их возвращения на заданные трассы. В соответствии с правилами и нормативными документами [1; 5–7] к маневру предъявляются следующие принципиальные технологические требования:

- как правило, разрешение КС должно выполняться маневром *только одного* ВС из конфликтующей пары и *только* в горизонтальной или *только* в вертикальной плоскости;
- маневру предписывается “S-образная” структура; он должен состоять из участка активного “уклонения”, обеспечивающего безопасное эшелонирование, участка прямолинейного движения – “выдерживания” – при расхождении (здесь задается временной интервал прямолинейного движения с постоянным направлением скорости и её постоянной величине), и участок маневра возвращения ВС на его трассу;
- для исключения дополнительных конфликтных ситуаций маневр в целом должен выполняться с *минимально–необходимым отклонением* маневра ВС от его трассы;
- маневр в целом должен иметь *минимальную продолжительность* и участки отклонения и возвращения должны выполняться за минимальное время на максимальной допустимой величине управления, причем точка начала маневра уклонения должна быть “не слишком далеко” от обнаруженной зоны КС;
- с другой стороны, обнаружение и анализ возможной КС выполняется периодически и начинается заранее (т.е. с запасом по расстоянию и времени) при таких начальных позициях судов, из которых разрешающий маневр гарантированно выполняется с запасом.

**Формулировка задачи.** *При заданном описании динамики ВС, упомянутых технологических требованиях и при заданной структуре маневра необходимо выбрать маневрирующее ВС и рассчитать его управление. Управление должно обеспечивать минимальное расстояние между судами не менее допуска безопасного эшелонирования в горизонтальной плоскости или по высоте при минимально–необходимом отклонении маневрирующего ВС от трассы с минимальной длительностью маневра и возвращения его на трассу.*

Очевидно, что такая формулировка не является математически строгой. Однако при учете и соответствующей формализации перечисленных выше технологических требований, поставленная задача достаточно строго решается с помощью следующих процедур.

1. Выполняется совместный прогноз движения данной пары судов, и рассчитываются параметры наихудшего сближения, принимается решение о наличии КС.

2. В зависимости от значений параметров наихудшего сближения выполняется классификация типа сближения и типа КС. Для каждого типа ситуации из заранее рассчитанного их набора выбирается совокупность формул, необходимых для расчета возможных разрешающих маневров. Для разрешения КС маневром, например, в горизонтальной плоскости, может существовать четыре возможных схемы: первое судно (ВС1) совершает маневр уклонения вправо или влево, или второе судно (ВС2) совершает маневр уклонения вправо или влево. (В вертикальной плоскости – аналогично.)

3. Для каждой из таких схем рассчитывается разрешающий маневр и сразу в процессе расчета конструктивно анализируется условие его существования, т.е. возможность обеспечения заданного безопасного расстояния при расхождении судов.

4. Рассчитанная информация об одном или, если существуют, нескольких допустимых маневрах передается диспетчеру системы УВД для принятия им окончательного решения. При этом диспетчер может гибко учитывать имеющуюся у него дополнительную информацию о воздушном движении в контролируемой зоне.

### 1. Входные данные

При разработке алгоритмов обнаружения и разрешения КС в качестве базового варианта рассматривался случай управляемого движения каждого ВС в *горизонтальной плоскости*. Движение описывается следующей, стандартизованной для навигационных расчетов, системой обыкновенных дифференциальных уравнений [10]:

$$x' = V_x = V \cos \psi, \quad z' = V_z = V \sin \psi, \quad \psi' = \beta / V, \quad |\beta(t)| \leq \beta_{\max}, \quad (1)$$

где  $x$  – ордината положения ВС по оси  $OX$  (направлена на север);  $z$  – абсцисса положения ВС по оси  $OZ$  (направлена на восток);  $\psi$  – путевой угол (направление вектора скорости в горизонтальной плоскости  $XOZ$ ), угол отсчитывается по часовой стрелке от оси  $OX$ ;  $\beta$  – управление воздушного судна, боковое ускорение с заданным (по модулю) ограничением  $\beta_{\max}$ ;  $V$  – скорость ВС. В рассматриваемой паре для каждого ВС заданы величины  $\beta_{1\max}$ ,  $\beta_{2\max}$ ,  $V_1$  и  $V_2$ , причем скорости их движения полагаются постоянными.

В соответствии с Правилами и Нормативными документами [1; 5–7] задается величина допустимого безопасного расстояния  $R_s$  между судами. Для простоты (и унификации) описания алгоритмов используем следующую условную систему координат. Условно полагается, что ВС с меньшей скоростью всегда имеет номер 1 (ВС1) и движется на север по оси своей трассы, направление которой всегда задается как  $\Psi_{1Tr} = \Psi_1 = 0$ . Судну с большей скоростью движения всегда присвоен номер 2 (ВС2), его трасса пересекает трассу движения ВС1 и имеет направление  $\Psi_{2Tr} = \Psi_{Tr}$ , (рис. 1). Данные углы будем называть *трассовыми*.

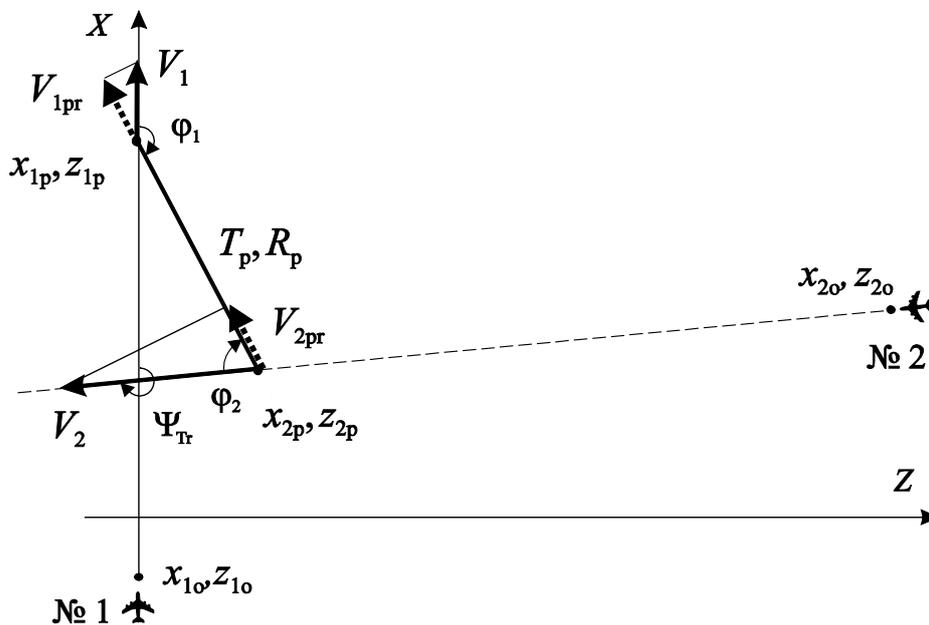


Рис. 1

В этой системе координат в начальный момент  $t_0 = 0$  задаются начальные позиции  $x_{1o}, z_{1o}$  первого ВС1 и  $x_{2o}, z_{2o}$  второго ВС2 судов.

В момент  $T_p$  наихудшего сближения судов в прогнозе на рис. 1 отмечены следующие параметры КС: позиции судов  $x_{1p}, z_{1p}$  и  $x_{2p}, z_{2p}$ , жирной линией показан вектор  $R_p$

относительного расстояния (по линии визирования) между ними, углы ориентации  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  этого вектора относительно осей трасс. Жирные сплошные стрелки отмечают вектора скоростей  $V_1$  и  $V_2$  движения судов; длины стрелок условно отражают величины этих скоростей. Векторы  $V_{1pr}$  и  $V_{2pr}$  (жирные штриховые стрелки) показывают проекции соответствующих скоростей судов на линию визирования “1–2”.

## 2. Прогноз конфликтной ситуации

В принятой модели равномерного прямолинейного движения судов момент  $T_p$  наихудшего сближения и наступления возможной КС совпадает с моментом равенства нулю производной  $R' = 0$  их относительного движения  $R(t)$ , т.е. при  $V_{1pr} - V_{2pr} = 0$ . Расчет этого момента выполняется по тривиальной формуле

$$(2) \quad T_p = -[(x_{2o} - x_{1o})(V_2 \cos \Psi_{Tr} - V_1) + z_{2o} V_2 \sin \Psi_{Tr}] / [(V_2 \cos \Psi_{Tr} - V_1)^2 + (V_2 \sin \Psi_{Tr})^2].$$

Расчет параметров наихудшего сближения выполняется по следующим формулам:

$$(3) \quad \begin{aligned} \text{– положения судов} \quad & x_{1p} = x_{1o} + V_1 T_p, \quad z_{1p} = 0, \\ & x_{2p} = x_{2o} + V_2 T_p \cos \Psi_{Tr}, \quad z_{2p} = z_{2o} + V_2 T_p \sin \Psi_{Tr}; \end{aligned}$$

$$(4) \quad \text{– минимальное расстояние } R_p \quad R_p = \text{Sqrt}\{(x_{2p} - x_{1p})^2 + (z_{2p} - z_{1p})^2\};$$

$$(5) \quad \begin{aligned} \text{– вспомогательный угол } \varphi_1 \quad & \pi - \text{arctg}(z_{2p} / (x_{1p} - x_{2p})), \text{ если } x_{1p} > x_{2p}, z_{2p} > 0, \\ & \pi - \text{arctg}(z_{2p} / (x_{1p} - x_{2p})), \text{ если } x_{1p} > x_{2p}, z_{2p} < 0, \\ & \text{arctg}(z_{2p} / (x_{2p} - x_{1p})), \text{ если } x_{1p} < x_{2p}, z_{2p} > 0, \\ & 2\pi + \text{arctg}(z_{2p} / (x_{2p} - x_{1p})), \text{ если } x_{1p} < x_{2p}, z_{2p} < 0; \end{aligned}$$

$$(6) \quad \begin{aligned} \text{– вспомогательный угол } \varphi_2 \text{ (рис. 1)} \quad & \pi - (\Psi_{Tr} - \varphi_1), \text{ если } 0 < \Psi_{Tr} < \pi, \\ & \pi + \Psi_{Tr} - \varphi_1, \text{ если } \pi < \Psi_{Tr} < 2\pi; \end{aligned}$$

$$(7) \quad \text{– точка пересечения трасс} \quad x_{Tr} = x_{2o} - z_{2o} / \text{tg } \Psi_{Tr}, \quad z_{Tr} = 0.$$

$$(8) \quad \begin{aligned} \text{Далее проверяется основное условие:} \quad & \text{если } R_p \geq R_s, \text{ то КС отсутствует;} \\ & \text{в противном случае, КС обнаружена.} \end{aligned}$$

## 3. Классификация типа конфликтной ситуации

Если КС обнаружена и её параметры рассчитаны, то тип КС можно классифицировать по параметрам (3) - (7). Именно, по относительному расположению судов (по вспомогательным углам) в прогнозируемый момент наступления КС, кто из них находится спереди, кто сзади, кто слева и кто справа, какова ориентация линии визирования “1–2”, и какое из воздушных судов обладает меньшей или большей скоростью.

В целом имеется 24 существенно различающихся типа КС в плоскости. По указанным параметрам (3) - (7) каждый из них определяется однозначно. Набор этих типов и их признаков рассчитывается заранее и хранится в памяти вычислительного комплекса АС УВД в качестве стандартной информации вместе с соответствующими расчетными формулами. Для идентифицированного типа КС анализируется реализуемость каждой из возможных упомянутых схем разрешающего маневра и рассчитываются его параметры.

## 4. Примеры конфликтных ситуаций и их разрешения

Поясним суть разработанного подхода, алгоритмов и процедур обнаружения, анализа и разрешения КС в горизонтальной плоскости на следующем примере. Ситуация представлена на рис. 2. Начальные позиции судов в момент  $t_0$  обозначены, соответственно, как  $(x_{10}, z_{10})$  и  $(x_{20}, z_{20})$ . Направления скоростей  $V_1$  и  $V_2$  движения судов показаны жирными сплошными стрелками. По договоренности будем полагать, что  $V_1 < V_2$ . Трассовые углы движения обозначены как  $\Psi_{1Tr} = 0$  и  $\Psi_{2Tr} = \Psi_{Tr} = 1,5\pi$ .

Пусть после работы процедуры прогноза конфликтная ситуация обнаружена, т.е.  $R_p < R_s$  (рис. 2). Этот тип КС однозначно идентифицируется по следующим признакам (3) – (7): более быстрое ВС2 в момент конфликта находится сзади медленного ВС1 и сзади–справа по отношению к направлению трассы ВС1, и пересекает его трассу справа–налево.

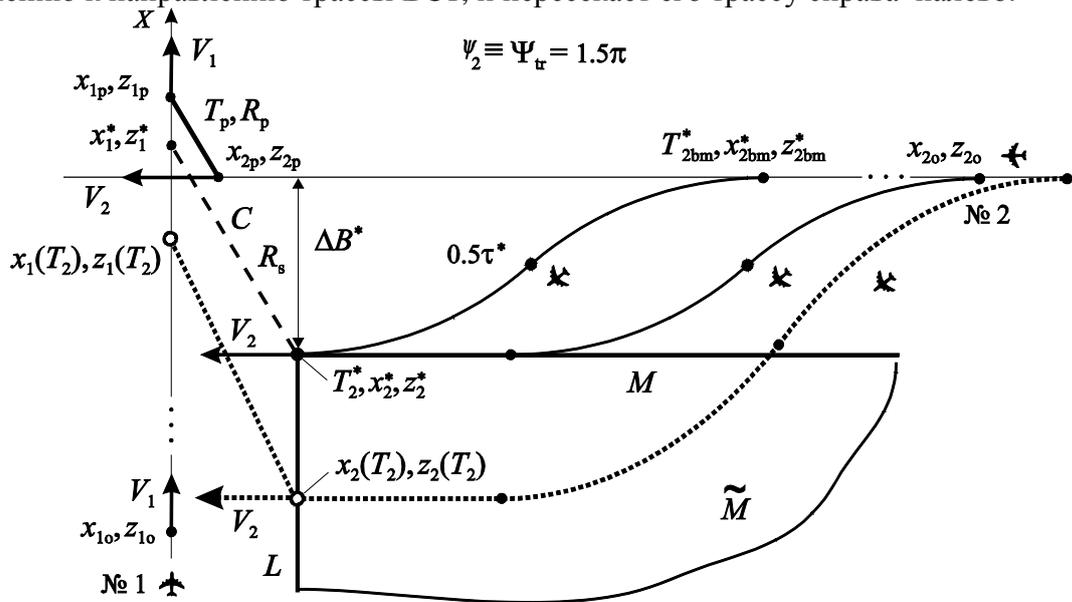


Рис. 2

Эти условия формализуются следующими простыми логическими соотношениями:

$$(9) \quad x_{1p} > x_{2p}, \quad x_{2p} > 0, \quad \pi < \Psi_{Tr} < 2\pi.$$

Как отмечалось выше, возможны четыре схемы разрешающего маневра в горизонтальной плоскости  $XOZ$ : ВС1 отворачивает вправо или влево (по отношению к направлению Трассы 1) или ВС2 отворачивает вправо или влево (по отношению к направлению Трассы 2). Рассмотрим случай маневра ВС2 влево. При заданной структуре всего разрешающего маневра большинство технологических требований (приведенных в параграфе 1) удовлетворяются, если выполняются следующие условия:

- маневр уклонения реализуется за минимальное время на максимальном  $\beta_{2max}$  боковом ускорении с одним переключением с  $-\beta_{2max}$  на  $\beta_{2max}$  и одинаковой продолжительностью каждой из половинок маневра уклонения (тонкие S-образные траектории);
- маневр уклонения должен заканчиваться с исходным направлением  $\Psi_{Tr}$  вектора скорости  $V_2$ ;
- при заданной длительности  $\tau_{tr}$  интервала выдерживания при расхождении, движение ВС2 продолжается с заданным направлением  $\Psi_{Tr}$  с его постоянной скоростью  $V_2$ ;

- маневр возвращения ВС2 на его трассу зеркально повторяет маневр увода на максимальном боковом ускорении с переключением с  $+\beta_{2\max}$  на  $-\beta_{2\max}$ ;
- в целом такой маневр одновременно обеспечивает минимальное боковое отклонение маневрирующего ВС2 от его трассы.

Если придерживаться этой последовательности действий, то остается выбрать только *точку начала маневра ВС2* и *продолжительность маневра уклонения* для обеспечения безопасного расстояния в новый момент их наихудшего сближения. Таким образом, первоначальная нестрогая формулировка (см. параграф 1) задачи разрешения КС сводится к строгому численному решению следующих вопросов:

- Возможно ли при заданных исходных данных обеспечить безопасное расстояние  $R_s$  конкретной схемой маневра увода и каково условие разрешимости данной КС?
- Если возможно, то, как вычислить необходимую точку начала маневра увода и его длительность?

Введем теперь ряд важных допущений и выполним вспомогательные геометрические построения. *Зафиксируем* ориентацию линии визирования “1–2”, рассчитанную в момент обнаружения КС в прогнозе. Введем *вспомогательный линейный отрезок С* длиной  $R_s$  с его левым (рис. 2) концом, скользящим вверх и вниз от точки  $x_{1p}$  по оси Трассы 1. При этом правый конец отрезка *С* образует *специальную* вспомогательную прямую линию *L*, параллельную оси Трассы 1.

Теперь будем начинать маневр уклонения ВС2 одинаковой продолжительности  $\tau$  из различных начальных точек  $x_{2o}, z_{2o}$  на Трассе 2. Тогда точки окончания всех таких маневров образуют *специальную* прямую линию *M*, параллельную Трассе 2 и отстоящую от трассы на боковое отклонение  $\Delta B$ . Обозначим  $x^*_2, z^*_2$  точку пересечения линий *M* и *L* и выберем стандартный маневр уклонения, который заканчивается в этой точке в момент  $T^*_2$ . Если в этот момент ВС1 находится в точке  $x^*_1, z^*_1$  (рис. 2), то отсюда следует, что точка  $x^*_2, z^*_2$  является *точкой наихудшего сближения* ВС2 с ВС1 вследствие равенства нулю производной их относительного расстояния. При этом маневр уклонения начинается из соответствующей начальной точки  $x^*_{bm}, z^*_{bm}$  в начальный момент  $T^*_{2bm}$  и безопасное расстояние  $R_s$  обеспечивается. Отметим очень важные свойства множества  $\tilde{M}$ , ограниченного сверху и слева линиями *M* и *L*.

1. Траектории всех маневров ВС2, начинающиеся правее точки  $x^*_{2bm}, z^*_{2bm}$  (рис. 2) и идущие после окончания маневра по линии *M*, все достигают точки  $x^*_2, z^*_2$  в *один и тот же момент*  $T^*_2$ .

2. Траектории всех более глубоких маневров, начинающихся правее точки  $x^*_{2bm}, z^*_{2bm}$  и выполняемых с большей длительностью  $\tau > \tau^*$  заканчиваются “глубже” во множестве  $\tilde{M}$ , например, жирная пунктирная траектория. При дальнейшем движении с постоянным путевым углом  $\Psi_{Tr}$  эта траектория приходит на линию *L* в точку  $x_2(T_2), z_2(T_2)$  в момент  $T_2$ , более поздний, чем соответствующий новый момент наихудшего сближения судов. При этом ВС1 будет находиться в соответствующей точке  $x_1(T_2), z_1(T_2)$  на оси своей трассы на расстоянии (жирный пунктир) от ВС2, большем величины  $R_s$  и безопасное расстояние будет обеспечено с запасом ценой большего бокового отклонения  $\Delta B$ .

3. Все траектории ВС2, начинающиеся в более поздние моменты времени левее “критической” точки  $x^*_{2bm}, z^*_{2bm}$  и выполняемые с *любой* длительностью  $\tau$  на *любом* допустимом уровне управляющего ускорения  $\beta_2$  приходят на продолжение вверх линии *L* (рис. 2) ранее момента  $T^*_2$ . Отсюда следует, что такие маневры в момент наихудшего

сближения обеспечивают расстояние, *обязательно меньшее* заданной величины безопасного расстояния  $R_s$ . Это означает также, что маневр уклонения длительности  $\tau^*$  и начинающийся из точки  $x^*_{2bm}$ ,  $z^*_{2bm}$  в момент  $T^*_{2bm}$ , является *предельным*, который еще обеспечит заданное безопасное расстояние  $R_s$ .

Выведем теперь *основное условие реализуемости* необходимого маневра уклонения с помощью следующих геометрических построений. Положим реализующееся боковое отклонение  $\Delta B$  переменным параметром. Каждое значение этого параметра определяет соответствующую точку  $x(\Delta B)$ ,  $z(\Delta B)$  на линии  $L$ , соответствующий левый конец  $x_1(\Delta B)$ ,  $z_1(\Delta B)$  вспомогательного отрезка  $C$  на Трассе 1 и момент  $T_1(\Delta B)$  прихода ВС1 в эту точку. Одновременно, при заданной структуре маневра уклонения, величина  $\Delta B$  определяет длительность  $\tau(\Delta B)$  маневра ВС2 в обратном времени из точки  $x(\Delta B)$ ,  $z(\Delta B)$  в некоторую начальную точку  $x_{2bm}(\Delta B)$ ,  $z_{2bm}(\Delta B)$ . Поскольку вследствие своего движения по Трассе 2 ВС2 может быть в этой точке  $x_{2bm}(\Delta B)$ ,  $z_{2bm}(\Delta B)$  лишь в момент  $T_{2bm}(x_{2bm}(\Delta B), z_{2bm}(\Delta B))$ , то момент его прихода в прямом времени в точку  $x(\Delta B)$ ,  $z(\Delta B)$  на линии  $L$  будет  $T_2(\Delta B) = T_{2bm}(\Delta B) + \tau(\Delta B)$ .

Заметим (рис. 3, численный модельный пример), что при возрастании величины  $\Delta B$  от нуля значение момента  $T_2(\Delta B)$  монотонно увеличивается, оставаясь всегда менее величины момента  $T_1(\Delta B)$ . Но в противоположность этому, величина  $T_1(\Delta B)$  монотонно убывает, будучи все время больше значения момента  $T_2(\Delta B)$ .

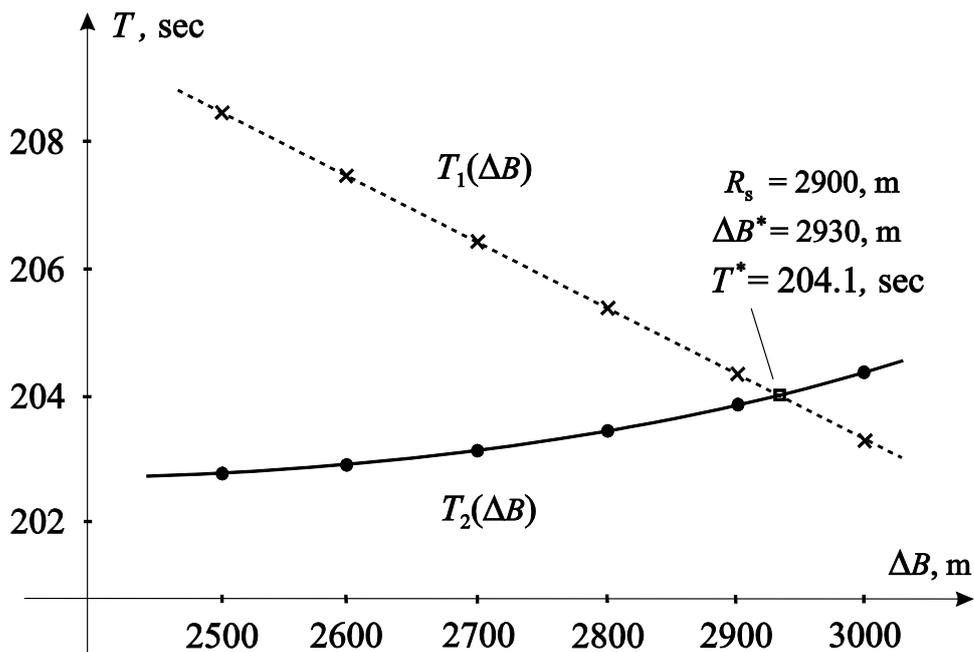


Рис. 3

Выполненный анализ позволяет сформулировать *необходимое и достаточное* условие реализуемости маневра уклонения. Оно заключается в равенстве моментов

$$T^*_2(\Delta B^*) = T^*_1(\Delta B^*), \quad (10)$$

прихода ВС2 в точку  $x^*_2(\Delta B^*)$ ,  $z^*_2(\Delta B^*)$  и, соответственно, прихода ВС1 в точку  $x^*_1(\Delta B^*)$ ,  $z^*_1(\Delta B^*)$  при минимальном по величине  $\Delta B^*$  бокового отклонения ВС2 от его трассы. Другими словами это условие означает, что если корень  $\Delta B^*$  уравнения (10) существует, то

оптимальный маневр уклонения может быть построен. В противном случае разрешающий маневр такой схемы не существует.

Отметим, что условие (10) является *конструктивным*, т.е. анализ существования маневра и расчет его параметров (предельного момента  $T_{2bm}^*$  начала, начальной точки  $x_{bm}^*$ ,  $z_{bm}^*$ , длительности  $\tau^*$  и точки завершения  $x_2^*$ ,  $z_2^*$ ) выполняются *одновременно*.

Уравнение (10) является трансцендентным, но вследствие монотонности зависимостей  $T_1(\Delta B)$  и  $T_2(\Delta B)$  (рис. 3) оно быстро решается численно. Разработан также быстрый алгоритм обнаружения случая отсутствия корня этого уравнения.

Для полноты анализа подобное исследование выполняется и для других упомянутых возможных схем маневра уклонения: маневр вправо ВС2 и правый и левый маневры ВС1. В общем случае при заданной величине  $R_s$  безопасного расстояния некоторые из этих маневров могут быть реализованы, а некоторые нет. Реализуемые маневры различаются своими параметрами, в частности, наиболее важными – необходимым боковым отклонением  $\Delta B^*$  и длительностью  $\tau^*$ .

Рассчитанная информация об одном или, если существуют, нескольких допустимых маневрах передается диспетчеру системы УВД для принятия им окончательного решения. При этом диспетчер может гибко учитывать имеющуюся у него дополнительную информацию о воздушном движении в контролируемой зоне. Выбирается необходимое ВС и схема его маневра.

Напомним, что в целом маневр, разрешающий обнаруженную КС, составляется из последующего заданного участка выдерживания при расхождении и участка быстреего возвращения маневрировавшего воздушного судна на его первоначальную трассу.

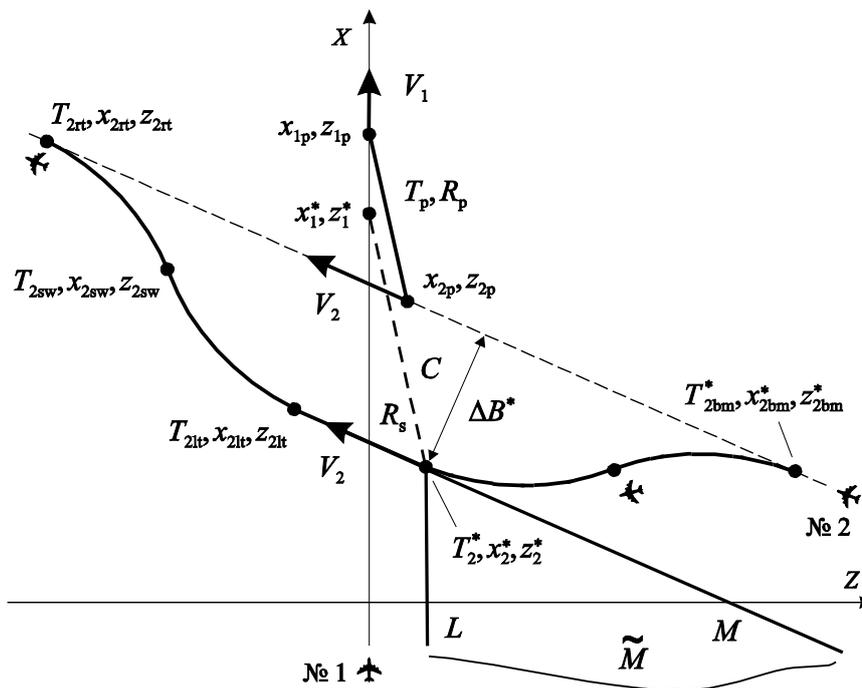


Рис. 4

Маневр возвращения является зеркальным отражением маневра уклонения. Пример разрешающего маневра и картины расхождения приведен на рис. 4. Здесь на маневре указаны характерные точки и их моменты:

$T_{2lt}, x_{2lt}, z_{2lt}$  – конца участка выдерживания;

$T_{2sw}, x_{2sw}, z_{2sw}$  – точки переключения управления на маневре возвращения;

$T_{2rt}, x_{2rt}, z_{2rt}$  – конечная точка маневра возвращения ВС2 на его исходную трассу.

Рис. 5 представляет КС другого типа и ее разрешение предпочтительным маневром медленного ВС1 вправо.

На практике существуют “вырожденные” типы конфликтных ситуаций, когда невозможно надежно рассчитать параметры КС. Картина может возникать, например, при столкновении ВС вследствие зашумленности входной практической информации о движении контролируемых воздушных судов или погрешностей вычисления прогноза. Такой тип КС приведен на рис. 6. Здесь жирным квадратиком отмечена приблизительная область наступления КС (по сути – область столкновения). Подобные случаи успешно обрабатываются предлагаемыми алгоритмами, и разрешающий маневр надежно строится.

На основе рассмотренных базовых алгоритмов разрешения КС в горизонтальной плоскости разработаны также алгоритмы разрешения пространственных конфликтных ситуаций при схемах маневра маневрирующего ВС в вертикальной плоскости. На рис. 7 приведен пример возникновения КС между ВС1, набирающим высоту, и ВС2, выполняющим снижение. Данная КС разрешается маневром ВС2 в вертикальной плоскости с обеспечением заданного безопасного эшелонирования  $H_s$  по высоте. В дополнение к системе (1), движение воздушных судов в вертикальной плоскости описывается дифференциальными уравнениями [10]

$$y' = V_y = V \sin \theta; \quad \theta' = \beta_{вр} / V; \quad |\beta_{вр}(t)| \leq \beta_{врmax}, \quad (11)$$

где  $y$  – координата положения ВС по высоте (по оси  $OY$ );  $\theta$  – скоростной угол (направление вектора скорости в вертикальной плоскости);  $\beta_{вр}$  – управление воздушного судна, вертикальное ускорение с ограничением  $\beta_{врmax}$  (соответственно  $\beta_{1врmax}, \beta_{2врmax}$ ).

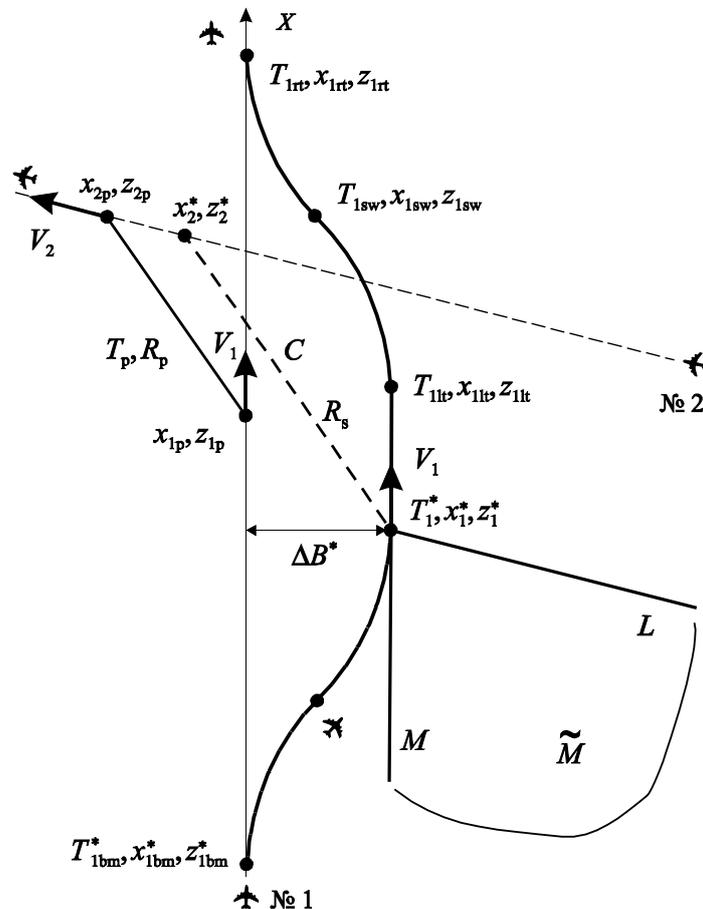


Рис. 5

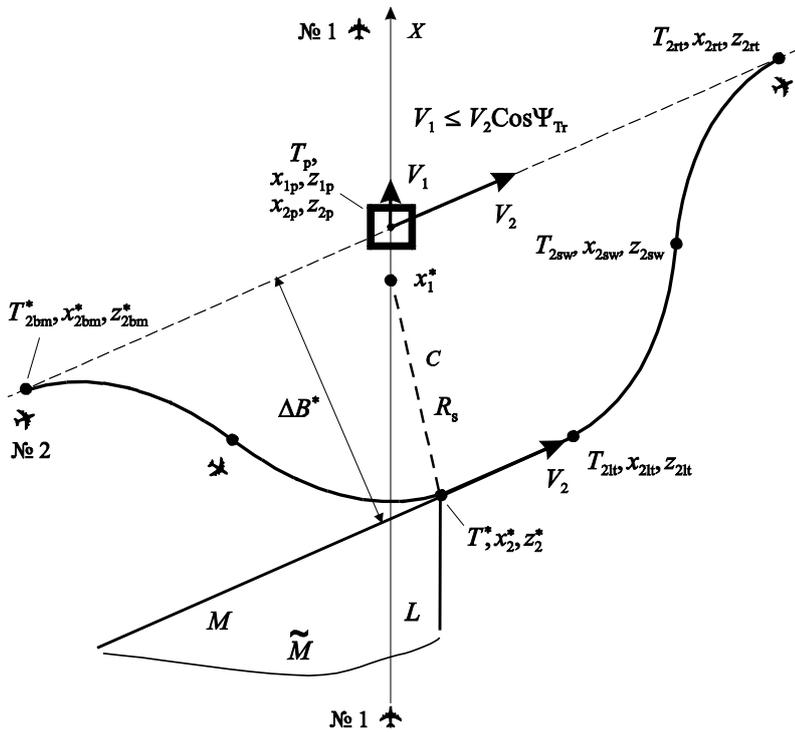
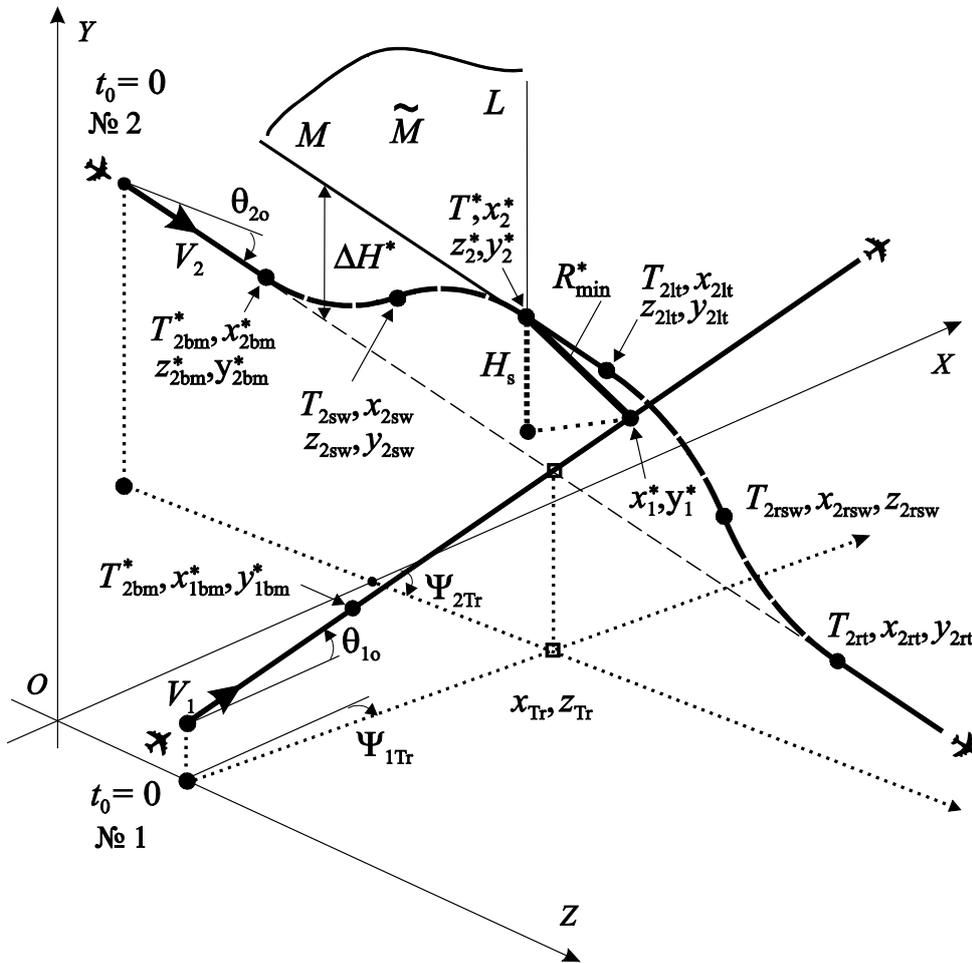


Рис. 6



### Рис. 7

Разрешение КС (рис. 7) обеспечивается по рассмотренной выше стандартной схеме маневра: сперва изменением скоростного угла от  $\theta_{20}$  вверх, затем выдерживанием этого угла на участке расхождения и, наконец, последующим возвратом на исходную траекторию снижения. При этом безопасное эшелонирование  $H_s$  по высоте обеспечивается с минимально-необходимым  $\Delta H^*$  отклонением ВС2 от его заданной траектории снижения и с минимальной длительностью всего разрешающего маневра.

Устойчивая работа созданных алгоритмов и соответствующего программного обеспечения была подтверждена достаточным объемом исследований на большом числе разнообразных модельных и специальных конфликтных ситуациях, однотипных реальным конфликтным ситуациям [8].

Алгоритмы подобного типа были разработаны и успешно применены для обеспечения безопасности воздушного движения при эксплуатации беспилотных летательных аппаратов [9].

Данные исследования были поддержаны Программой 12-П-1-1002 УрО РАН, грантом РФФИ проект №12-01-00537 и компанией "Новые информационные технологии в авиации (НИТА)" (Санкт-Петербург, Россия) по контракту № 745-12У.

### Заключение

Разработаны алгоритмы обнаружения и разрешения конфликтных ситуаций между двумя маневрами ВС в горизонтальной или вертикальной плоскостях. Алгоритмы прямо учитывают требования Правил и Нормативных документов по управлению воздушным движением. Алгоритмы являются новыми, конструктивными и могут быть использованы в перспективных автоматизированных системах управления воздушным движением и бортовых системах для предотвращения столкновений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д.** Автоматизация управления воздушным движением. Москва. – М.: Транспорт, 1992.
2. **Липин А.В., Олянюк П.В.** Бортовые системы разрешения конфликтов между самолетами. – СПб.: Академия гражданской авиации, 1999.
3. **Tomlin C., Lygeros J, and S.R. Sastry.** Conflict Resolution for Air Traffic Management: a Study in Multi-Agent Hybrid Systems. Report of the Research under NASA Grant NAG-2-1039}. University of California, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, 1998.
4. **Tomlin C., Lygeros J, and S.R. Sastry.** Synthesizing Controllers for Nonlinear Hybrid Systems. Report of the Research under NASA Grant NAG-2-1039. University of California, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, 1997.
5. **Белкин А.М., Миронов Н.Ф., Рублев Ю.И., Сарайский Ю.Н.** Воздушная навигация: справочник. – М.: Транспорт, 1998.
6. **Пятко С.Г., Красов А.И. и др.** Автоматизированные системы управления воздушным движением. – СПб.: Политехника, 2004.
7. **Королев Е.Н.** Технологии работы диспетчеров управления воздушным движением. – М.: Воздушный транспорт, 2000.
8. **Kumkov S.I.** Conflict Detection and Resolution in Air Traffic Control // IFAC on-line Journal Automatic Control in Aerospace, 2009, paper AS-09-04.
9. **Токарев Ю.П.** Методы управления беспилотными летательными аппаратами в общем воздушном пространстве с использованием полетной информации при автоматическом зависимом наблюдении: дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 2012.
10. **ГОСТ 20058-80.** Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. – М.: Госстандарт, 1980.

**Сведения об авторах**

**Кумков Сергей Иванович**, 1941 г. р., окончил Уральский политехнический институт (1964), кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий Уральского федерального университета РАН, автор более 90 научных работ, область научных интересов – автоматическое и оптимальное управление динамическими системами, обработка, идентификация и оценивание информации в условиях неопределенности.

E-mail: kumkov@imm.uran.ru

**Пятко Сергей Григорьевич**, 1959 г. р., окончил Академию гражданской авиации (1980), доктор технических наук, профессор, директор Филиала «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИ ГА, автор 83 научных работ, область научных интересов – автоматизированные системы управления воздушным движением.

E-mail: ads@atminst.ru