

УДК 656.7.022

А.В. ИЗВАЛОВ

*Кировоградская лётная академия Национального авиационного университета, Украина*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕНЫ РЕЖИМА ПОЛЁТА ВОЗДУШНОГО СУДНА ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНО-КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ

*Рассматривается вопрос выбора модели движения воздушного судна в решении задачи автоматического формирования учебных заданий для тренажёра управления воздушным движением. Определяется область применимости кусочно-линейных моделей. Выводятся формулы поправок для определения положения воздушного судна при создании потенциально-конфликтных ситуаций. Предложенные подходы позволяют повысить адекватность работы генератора упражнения. Внесённые в сценарий упражнения потенциально-конфликтной ситуации будут иметь место при его практическом выполнении. При этом обеспечится соответствие пространственно-временных координат и сложности реальных потенциально-конфликтных ситуаций проектируемым.*

**Ключевые слова:** потенциально-конфликтная ситуация, моделирование, управление воздушным движением, диспетчерский тренажёр, генерация упражнений.

### Введение

Согласно данным Государственного предприятия обслуживания воздушного движения Украины (Укрээрорух), интенсивность воздушного движения в Украине постоянно растёт. Данная тенденция будет наблюдаться и в будущем. Вследствие ограниченности пропускной способности воздушного пространства это означает дальнейшее повышение рабочей нагрузки на авиадиспетчера.

За последние 15 лет в мире, согласно исследованиям Международной организации гражданской авиации (ИКАО), недостатки управления воздушным движением (УВД), самостоятельно или в комплексе с ошибкой пилота, послужили причиной 15,2% среди всех авиационных происшествий по вине человеческого фактора. В странах СНГ аналогичный показатель составил 32,9%. Повышение качества УВД является одним из приоритетных направлений повышения безопасности полётов ещё и потому, что в 61% авиационных происшествий, фактором которых выступила ошибка диспетчера, участвовало 2 и более воздушных судна (ВС).

Важнейшую роль в развитии и поддержании на регламентированном уровне умений и навыков УВД играет тренажёрная подготовка. Перспективным подходом к повышению её эффективности является переход к генерации индивидуальной последовательности учебных заданий для каждого обучаемого. Изменение сложности упражнений на протяжении курса, обеспечивающее лучшее формирование и закрепление умений и навыков УВД определяется исходя из его индивидуальных особенностей. [1]. Однако индивидуальный подход к тренажёрной подготовке авиадиспетчеров существенно повысит

потребность в количестве используемых в тренажёрном центре упражнений. Поэтому возникает необходимость в разработке методик автоматического формирования упражнения, обеспечивающего требуемый обучающий эффект и имеющего заданный уровень сложности.

Существенным этапом формирования упражнения является включение в его сценарий потенциально-конфликтных ситуаций (ПКС), т.е. выбор таких параметров полёта ВС, при которых без вмешательства авиадиспетчера расстояние между ними сократится ниже установленных норм эшелонирования.

### 1. Пути управления сложностью ПКС в упражнении

Одним из усложняющих факторов в упражнениях на решение конфликтов является явность/скрытость ПКС. Рассмотрим две ситуации нарушения норм эшелонирования на пересекающихся воздушных трассах (рис. 1).

Допустим, оба ВС имеют одинаковые скоростные характеристики. На рис. 1, а изображено начальное положение ВС, при котором оба они достигают точки пересечения трасс в один и тот же момент (рис. 1, б, и у обучаемых, как правило, не вызывает сомнений необходимость принять меры по обеспечению эшелонирования между ними).

На рис. 1, в изображено начальное положение, при котором первое ВС достигает точки пересечения трасс ранее второго и необходимость во вмешательстве и изменении параметров полёта для обеспечения эшелонирования часто бывает неочевидна. Однако, как показано на рис. 1, г, такая ситуация также может привести к конфликту.

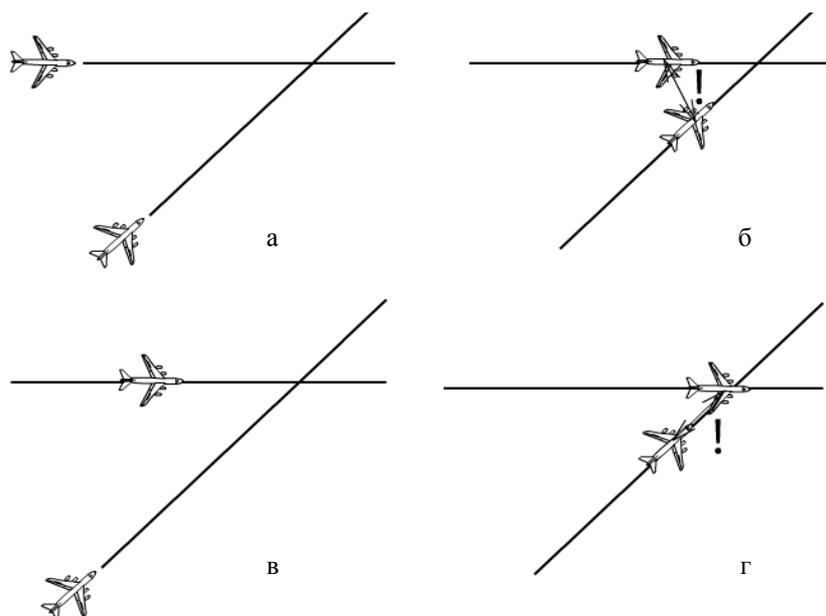


Рис. 1. Явная и скрытая ПКС

С целью развития умений и навыков выявления как явных, так и скрытых конфликтов, при автоматической генерации упражнения должно варьироваться время входа ВС в воздушную зону относительно конфликтующего с ним ВС. Для вывода формул разности между моментами входа конфликтующих ВС в подконтрольную воздушную зону, при которой при отработке упражнения на тренажёре УВД произойдёт ПКС необходимой сложности, необходимо применить адекватную модель движения ВС. В горизонтальном полёте в большинстве случаев приемлемой является линейная модель. Однако в случае смены режима полёта данная модель может не обеспечивать достаточную точность.

**2. Сравнение линейных и нелинейных моделей смены режима полёта ВС**

В зависимости от поставленной задачи, полёт ВС может описываться различными по сложности уравнениями и их системами [2]. Однако, вследствие того, что в задаче генерации ПКС в упражнениях на диспетчерском тренажёре такая точность излишня, в большинстве случаев используется линейная модель движения ВС. Однако такая модель может нуждаться в корректировке для адекватного, в рамках поставленной задачи, отображения смены режима полёта ВС и происходящей в этот промежуток времени ПКС.

Пусть ВС выполняет прямолинейный полёт, описываемый уравнением  $s_1(t) = V_1t + b_1$ , и в момент  $t_0$  начинает менять скорость на  $V_2$ . Тогда после смены режима полёта его движение будет описываться уравнением  $s_2(t) = V_2t + b_2$ . Если принять, что изменение скорости ВС происходит мгновенно, параметр  $b_2$  находим из уравнения

$$V_1t_0 + b_1 = V_2t_0 + b_2.$$

Таким образом,

$$s_2(t) = V_2t + (V_1 - V_2)t_0 + b_1.$$

Однако в реальности смена режима полёта занимает некоторое время, равное  $\Delta t$ . Движение ВС во время этой смены в первом приближении можно принять за равноускоренное с ускорением  $a$  (рис. 2). В таком случае, это движение может быть описано уравнением

$$s_3(t) = \frac{a(t-t_0)^2}{2} + V_1(t-t_0) + s_1(t_0)$$

или, упростив,

$$s_3(t) = \frac{a(t-t_0)^2}{2} + V_1t + b_1.$$

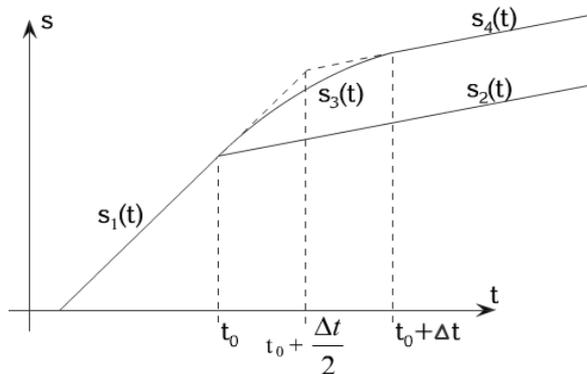


Рис. 2. Модели смены режима полёта ВС

Время  $\Delta t$ , необходимое для смены скорости с  $V_1$  на  $V_2$ , двигаясь с ускорением  $a$ , равно:

$$\Delta t = \frac{V_2 - V_1}{a}.$$

Затем ВС продолжает равномерный полёт, описываемый уравнением

$$s_4(t) = V_2 t + b_4.$$

Поскольку при использовании данной модели, прямая  $s_4(t)$  будет касательной к параболе  $s_3(t)$  в точке с абсциссой  $t = t_0 + \Delta t$ , свободный член в уравнении этой прямой найдём, приравняв:

$$s_3(t_0 + \Delta t) = s_4(t_0 + \Delta t);$$

$$\frac{a\Delta t^2}{2} + V_1 \Delta t + V_1 t_0 + b_1 = V_2 t_0 + V_2 \Delta t + b_4.$$

Подставив выражения для  $\Delta t$ , и упростив, получим:

$$b_4 = -\frac{(V_1 - V_2)^2}{2a} + (V_1 - V_2)t_0 + b_1.$$

Таким образом,

$$s_4(t) = V_2 t - \frac{(V_1 - V_2)^2}{2a} + (V_1 - V_2)t_0 + b_1.$$

Сравним, как будут различаться результаты при внесении ПКС в упражнение с использованием модели 1 (кусочно-линейная, смена  $s_1(t)$  на  $s_2(t)$  в момент  $t_0$ ), и модели 2 (нелинейная, смена  $s_1(t)$  на  $s_3(t)$  в момент  $t_0$  и  $s_3(t)$  на  $s_4(t)$  в момент  $t_0 + \Delta t$ ).

Наибольшее расхождение между вычисленными положениями ВС при использовании этих моделей будет равно разности

$$b_4 - b_2 = -\frac{(V_1 - V_2)^2}{2a}.$$

Таким образом, для Boeing-757, замедляющегося в полёте по маршруту с 848 км/ч до 740 км/ч (на 30 м/с) с ускорением  $1,5 \text{ м/с}^2$ , отклонение результата, полученного с помощью модели 1 по сравнению с моделью 2, окажется равным 300 м. Это составляет 1,5% от нормы продольного эшелонирования при следовании на одном эшелоне. Однако данная ошибка будет накапливаться при дальнейших эволюциях ВС и к моменту выхода ВС из воздушной зоны может составить существенную величину. Таким образом, при использовании формул, основанных на модели 1 для генерации конфликтов в упражнении можно прийти к ситуации, в которой заложенный конфликт не будет иметь места при выполнении реального упражнения, или же, появятся непредусмотренные сценарием конфликты. В обоих случаях обучающий эффект упражнения будет снижаться.

Рассмотрим второй вариант замены нелинейной модели 2 линейной моделью. В модели 3 для определения параметров движения ВС будет использоваться формула  $s_2(t)$  до некоторого момента между  $t_0$  и  $t_0 + \Delta t$ , а для продолжения – формула  $s_4(t)$ .

Найдём точку пересечения прямых  $s_1(t)$  и  $s_4(t)$ , решив уравнение:

$$V_1 t + b_1 = V_2 t - \frac{(V_1 - V_2)^2}{2a} + (V_1 - V_2)t_0 + b_1;$$

$$t = t_0 + \frac{\Delta t}{2}.$$

Таким образом, графики функций  $s_1(t)$  и  $s_4(t)$  пересекаются точно в середине интервала  $[t_0; t_0 + \Delta t]$  смены режима полёта.

Поскольку с увеличением абсциссы расстояние от параболы до касательной возрастает, наибольшее расстояние по оси  $s$  между параболой и ломаной

будет при  $t = t_0 + \frac{\Delta t}{2}$  и составит:

$$\Delta s = s_1\left(t_0 + \frac{\Delta t}{2}\right) - s_3\left(t_0 + \frac{\Delta t}{2}\right),$$

$$\Delta s = \frac{(V_1 - V_2)^2}{8a}.$$

Таким образом, для тех же условий, максимальное отклонение результатов, получаемых с помощью модели 3, по сравнению с моделью 2, составит 75 м. Отклонение будет иметь место лишь в течение относительно небольшого периода  $\Delta t$  и обратится в 0 при восстановлении равномерного полёта. Но, поскольку данное отклонение прямо пропорционально квадрату разности скоростей, рассмотрим другой случай. Достижение Ту-154 крейсерской скорости 260 м/с со скорости на высоте круга 110 м/с с ускорением  $2 \text{ м/с}^2$ . Подставив данные в формулу, получим максимальную разность положений ВС при использовании различных моделей в 1 км 125 м, что уже составляет более 5% от нормы продольного эшелонирования.

Ещё один аспект, на который стоит обратить внимание – то, что в реальности разгон и торможение ВС не являются равноускоренными. В начале и в конце смены режима полёта ускорение ВС меньше среднего, а в середине – превышает его. Таким образом, график движения ВС при использовании модели, максимально приближенной к реальному поведению ВС, будет лежать между ломаной и параболой (изображён как  $s_5(t)$  на рис. 3).

Построим график движения конфликтующего ВС  $s_k(t)$ . Параллельной ему пунктирной линией покажем положение точки, лежащей впереди по маршруту движения, отстоящей от этого ВС на величину продольного эшелонирования  $\Delta s_{\text{эш}}$ .

Варьируя момент появления конфликтующего ВС в упражнении, можно получить следующие ситуации:

Расстояние между графиком  $s_k(t)$  и любым из графиков  $s_i(t)$ ,  $i \in \{1, 3, 4, 5\}$  превышает  $\Delta s_{\text{эш}}$ .

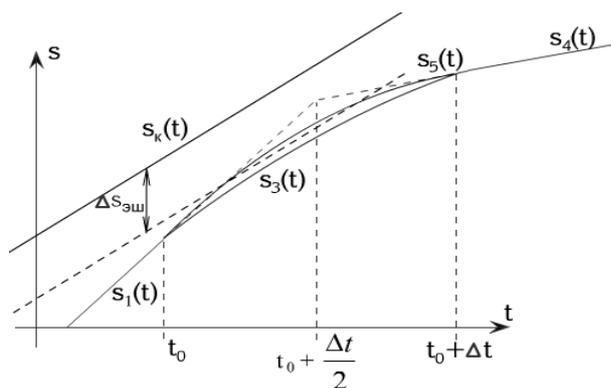


Рис. 3. Сравнение моделей движения ВС при определении наличия нарушения норм эшелонирования

Нарушается норма эшелонирования только между  $s_k(t)$  и  $s_1(t)$  и  $s_4(t)$ .

Дополнительно нарушается эшелонирование между  $s_k(t)$  и  $s_5(t)$  (ситуация, показанная на рис. 3)

Расстояние между  $s_k(t)$  и всеми остальными графиками менее  $\Delta s_{\text{эш}}$ .

Таким образом, при вычислении наличия конфликта с использованием формул, основанных на модели 3, возможна ситуация, при которой в реальности эшелонирование нарушено не будет. А при использовании же модели 2, возможна обратная ситуация: формула показывает отсутствие конфликта, который в реальности будет иметь место.

Однако следует учесть, что в реальности диспетчер старается обеспечить интервалы между ВС, превышающие нормы эшелонирования. Поэтому, как в случае внесения на основе формул из модели 3 в сценарий упражнения расстояния между двумя ВС в 20,5 км (которое при выполнении его может оказаться равным 21,5 км), так и при величине 19,5 км (реальное – 20,5 км), авиадиспетчер всё равно будет предпринимать изменения параметров полёта ВС для предотвращения конфликтной ситуации, и такие его действия будут верными.

### 3. Поправка для учёта изменения направления полёта ВС

Хотя при генерации упражнения маршрут ВС задаётся в виде последовательности точек и соединяющих их отрезков, при его выполнении на тренажёре УВД смена курса происходит по дуге окружности (рис. 4).

Найдём разность длин ломаной ABC (траектории движения ВС согласно плана) и дуги ABC (реальной траектории движения) при смене курса на угол  $\angle CBD = \alpha$ . Т.к. AB и AC – касательные к окружности радиусом R и с центром в т.О, то после выполнения разворота искомая разность составит:

$$\Delta s = 2Rtg \frac{\alpha}{2} - R\alpha = R \left( 2tg \frac{\alpha}{2} - \alpha \right).$$

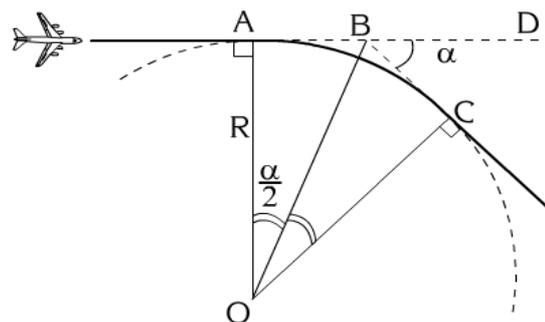


Рис. 4. Смена курса ВС по дуге окружности

Для поворота Boeing-757 при полёте по маршруту со скоростью 220 м/с и креном  $10^\circ$  радиус разворота R составит 25 км. При повороте на угол  $\alpha = 60^\circ$  данная разность  $\Delta s$  составит 2,7 км. С каждым новым участком маршрута, требующим смены курса, данная величина будет накапливаться. Причём, наиболее значительный вклад будет вноситься именно сменой курса по маршруту, поскольку радиус разворота на круге уменьшается, вследствие меньших скоростей и большего допустимого крена. Для Boeing-757  $\Delta s$  на круге будет составлять величину порядка 0,5 – 1 км.

Путь к учёту данной погрешности состоит в следующем. При генерации конфликтов использованием алгоритма, описанного в [3], для вычисления момента входа на очередное звено маршрута ВС следует модифицировать формулу определения момента входа ВС на i-й участок маршрута. Она будет выглядеть как:

$$T_i^{\text{âò}} = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{L_j - R_j \left( 2tg \frac{\alpha_j}{2} - \alpha_j \right)}{V_j},$$

где  $L_j$  – длина j-го участка маршрута,

$V_j$  – средняя скорость ВС на нём.

$R_j$  – радиус разворота при переходе с j-го участка маршрута на (j+1)-й,

$\alpha_j$  – угол между j-м и (j+1)-м участками маршрута.

Таким образом, сгенерированные с учётом этой поправки конфликты действительно будут иметь место при выполнении упражнения, причём сохранится предусмотренная для них сложность обнаружения ПКС.

### Выводы

Полученные формулы позволяют сказать, что использование кусочно-линейной модели смены режима полёта ВС, в которой изменение скорости считается мгновенным, происходящим точно посередине интервала смены режима полёта, может использоваться с приемлемой точностью как основа

ние для генерации ПКС в упражнении на диспетчерском тренажёре.

Однако, при создании упражнений по работе на диспетчерском пункте «Подход» или «Круг», характеризующихся более динамичными изменениями скоростей и меньшими нормами эшелонирования, целесообразно рассматривать смену режима полёта как равноускоренное движение. Необходимый для создания ПКС интервал входа ВС в воздушную зону определяется из неравенства

$$s_k(t) - s_3(t) \leq \Delta S_{\text{эш.}}$$

Более существенную погрешность вносит пренебрежение движением ВС по окружности при смене курса в полёте по маршруту. Однако, её легко нивелировать введением дополнительного слагаемого в формуле вычисления момента появления ВС в начале очередного участка маршрута.

Таким образом, совместно, эти подходы позволяют повысить адекватность работы генератора упражнения. Внесённые в сценарий упражнения ПКС

будут иметь место при его практическом выполнении. При этом обеспечится соответствие пространственно-временных координат и сложности реальных ПКС проектируемым.

## Литература

1. Atem, L. *Towards an assessment of skill acquisition in student modeling [Text]* / L. Atem, K. Yacef // *Proc. of the 8th conference on Artificial Intelligence in Education (AIED'97)*, B. du Boulay and R. Mizoguchi (eds) Kobe, Japan, IOS Press. – P. 530 – 536.

2. Казак, В.М. *Моделирование динамики полета магистрального самолета на исследовательском стенде [Текст]* / В.М. Казак, К.Р. Лейва, Е.Ю. Яковичка // *ААЭКС*. – 2009. – Вып. 1 (23). – С. 41 – 44.

3. Извалов, О.В. *Алгоритм обработки данных повітряної зони, що забезпечує можливість автоматичної генерації навчальних вправ [Текст]* / О.В. Извалов, В.М. Неділько, С.М. Неділько // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2009. – № 5 (46). – С. 301 – 304.

Поступила в редакцию 16.02.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.В. Дрозд, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ РЕЖИМУ ПОЛЬОТУ ПОВІТРЯНОГО СУДНА ПРІ СТВОРЕННІ ПОТЕНЦІЙНО-КОНФЛІКТНИХ СИТУАЦІЙ

*О.В. Извалов*

Розглядається питання вибору моделі руху повітряного судна у розв'язанні задачі автоматичного формування навчальних завдань для тренажера управління повітряним рухом. Визначається область застосування кусково-лінійних моделей. Виводяться формули поправок для визначення положення повітряного судна при створенні потенційно-конфліктних ситуацій. Запропоновані підходи дозволяють підвищити адекватність роботи генератора вправи. Внесені до сценарію вправи потенційно-конфліктної ситуації матимуть місце при його практичному виконанні. При цьому забезпечиться відповідність просторово-часових координат і складності реальних потенційно-конфліктних ситуацій проектованою.

**Ключові слова:** потенційно-конфліктна ситуація, моделювання, управління повітряним рухом, диспетчерський тренажер, генерація вправ.

## MODELLING THE AIRCRAFT'S FLIGHT MODE CHANGE WHILE GENERATING POTENTIALLY-CONFLICTING SITUATIONS

*A.V. Izvalov*

Modeling ways aircraft movement in the task of automatic training exercise design for air-traffic control simulator are considered. The piecewise-linear model application field is determined. The formulas of adjustments for determining aircraft position in the potentially-conflicting situation generations are given. Offered approach allow to promote adequacy of work of generator of exercise. The exercises of potentially-conflict situation borne in a scenario will take a place at his practical implementation. Thus accordance of spatio-temporal co-ordinates and complication of the real potentially-conflict situations will be provided designed.

**Key words:** potentially-conflicting situation, modeling, air traffic control, ATC simulator, exercise design.

**Извалов Алексей Владимирович** – преподаватель кафедры информационных технологий Кировоградской лётной академия Национального авиационного университета, Кировоград, Украина.