

УДК 629.7.067

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-116-130

## ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ПОЛЕТА ГРУППЫ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПРИ ИХ СБЛИЖЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ-ДИСПЕТЧЕРА

Д.А. МИХАЙЛИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
г. Москва, Россия

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ  
(гранты № 15-08-00043, № 17-29-03185 и № 16-08-00070)

В работе представлен подход к решению задачи обеспечения безопасности полета воздушного судна при наличии внешних угроз в виде воздушных судов-нарушителей. Приводится алгоритм расчета коэффициентов опасности столкновения с воздушными судами-нарушителями, на базе которых формируется бортовая программа-диспетчер контроля безопасности полета.

Вводятся два коэффициента опасности: в горизонтальной и вертикальной плоскостях. На основании различных полетных ситуаций предлагается четыре варианта принятия решения: отсутствие каких-либо действий воздушных судов (ВС), изменение эшелона, уклонение в горизонтальной плоскости и уклонение как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Для каждого случая получены формулы двойной оценки, учитывающие различные параметры взаимного движения воздушных судов. На базе этих оценок можно построить итоговую экспертную оценку для рассмотренных полетных ситуаций, которая реализована в бортовой программе-диспетчере. Приведена структура указанной программы. На выходе программы-диспетчера формируются оценки величины ожидаемого минимизируемого риска и выбранная альтернатива уклонения ВС от точки встречи. В работе представлено подробное описание процедуры тестирования работы алгоритмов программы-диспетчера, приводятся начальные условия для разных полетных ситуаций. Приводятся результаты моделирования работы алгоритма. Проиллюстрировано сравнение результатов вычисления коэффициентов опасности при выполнении манёвров по предотвращению опасного сближения и при их отсутствии. Показано, что выполнение рекомендованных алгоритмами программы-диспетчера маневров приводит к уменьшению итогового коэффициента опасности. Особое внимание было уделено процессу посадки воздушного судна, особенно при наличии в районе посадки нескольких конфликтующих воздушных судов.

**Ключевые слова:** программа-диспетчер, безопасность полета, летательный аппарат.

### ВВЕДЕНИЕ

Введение в практику эксплуатации гражданской и военной авиации системы автоматического непрерывного контроля безопасности полёта стало насущной необходимостью ввиду значительного и недопустимого числа лётных происшествий, связанных с гибелью пассажиров и экипажа.

Прежде всего необходимо отметить, что пока единой интегральной системы автоматического контроля безопасности полёта на борту нет, а имеются лишь отдельные подсистемы контроля для решения частных задач [1, 2].

Существуют подходы для решения задачи предотвращения конфликтных ситуаций в полете с помощью динамического программирования. В частности, в [3] решается задача определения оптимального времени для маневра уклонения.

Известно, что предотвращение столкновения с воздушными судами в полете обеспечивается строгим выдерживанием заданных эшелонов, безопасных продольных и боковых интервалов, а также соблюдением установленных правил полетов [4, 5]. Но на практике возникают ситуации, когда необходимо предпринимать оперативные действия для снижения угрозы столкновения ВС в районе посадки. Например, при обосновании норм эшелонирования установлено допустимое значение риска (target level of safety) равно  $2,5 \cdot 10^{-9}$  1/ч. Под риском здесь понимается среднее количество катастроф из-за столкновений воздушных судов, прихо-

дящееся на один час налета. При заходе на посадку допустимым считается риск, соответствующий в среднем одному столкновению с препятствием на 10 миллионов заходов на посадку [6].

Структурные системообразующие недостатки общего характера при заходе на посадку и самой посадке таковы:

- при одновременном возникновении нескольких угроз отсутствует способность ранжировать опасности разного типа и автоматически выявлять доминирующую угрозу, требующую первоочередного предотвращения;
- неспособность количественно оценивать степень опасности каждой угрозы и ранжировать их, а значит, альтернативно выбирать для угрозы лучший способ её предотвращения;
- несоблюдение во всех случаях прогнозирующих свойств контроля безопасности, причем в двух вариантах – «пессимистическом» и «оптимистическом» прогнозе с учетом разной степени опасности сигналов предупредительной и аварийной тревоги.

Считая, что в техническом отношении борт оснащен достаточным количеством датчиков, содержащих прямую измерительную и косвенную информацию [7], можно сформулировать следующие требования к программному обеспечению системы (ПО).

Программа-диспетчер должна выполнять следующие четыре основных действия:

- 1) анализировать коэффициенты опасности различных одновременно возникающих угроз;
- 2) выбирать доминирующую угрозу и определять степень ее опасности;
- 3) выбирать необходимую меру предотвращения угрозы;
- 4) определять коэффициент уверенности альтернативного выбора.

Каждый частный алгоритм обнаружения и предотвращения угрозы состоит из двух блоков – предупреждения опасных ситуаций с помощью прогнозируемого контроля и многоальтернативного выбора способа их предотвращения. В свою очередь прогноз должен быть осуществлён одновременно дважды: при оптимальном, экстренном управлении и при обычном штатном малоактивном управлении.

В данной работе предлагается единый подход к прогнозируемой оценке степени опасности различных угроз и их предотвращению.

### **ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ЕДИНОЙ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ В ВИДЕ СВЕРТКИ НА ЭТАПЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ УГРОЗ**

При анализе безопасности полетных ситуаций необходимо учитывать множество угроз различного типа.

Считая, что степень опасности любой угрозы зависит, по крайней мере, от трех показателей:

- штрафной функции  $\Pi_k$  прогнозируемого риска, соответствующей максимальной стоимости ожидаемого ущерба аварийной ситуации;
- располагаемого времени  $\Delta t_k$  для предотвращения опасной полетной ситуации;
- требуемого времени  $\tau_k$  на исправление опасной ситуации,

существующее на данный момент представление о коэффициенте опасности расшифровывается следующей формулой:

$$P_k = \frac{M_k \Pi_k(x, y, z)}{\left(1 + \frac{\Delta t_k}{\tau_k}\right)} \quad (1)$$

В формуле (1) учтены следующие зависимости:

- чем больше ожидаемая штрафная функция риска  $\Pi_k$ , тем пропорционально больше опасность;

- чем больше относительный запас времени  $\frac{\Delta t_k}{\tau_k}$ , тем меньше угроза, и, наоборот, при уменьшении располагаемого времени  $\Delta t_k$  (из-за запоздалой реакции экипажа в частности)  $k$ -я угроза становится более первоочередной. При этом существует допущение, что применяемые прогнозирующие свойства контроля таковы, что всегда  $\frac{\Delta t_k}{\tau_k} \geq 1$ ;

- число  $M_k$  экспертным путем подгоняет масштабы коэффициентов опасности каждой угрозы так, чтобы в ряде конкретных равноценных случаев у разных угроз их значения  $F_k$  были равны друг другу;

- размерность коэффициентов опасности  $\rho_k$  для разных угроз одинакова, так как путём нормирования эти коэффициенты становятся безразмерными числами.

В случае опасного сближения двух воздушных судов (ВС) в лётном руководстве и других официальных документах ВС уклонение по высоте считается достаточным, независимо от дистанции в горизонтальной плоскости. В другом упоминаемом случае считается достаточно безопасным расстояние 6000 м между двумя ВС, независимо от их эшелонирования на высоте [8]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что суммарный коэффициент опасности  $P_\Sigma$  при сближении двух ВС оценивается по формуле

$$P_\Sigma = \min\{P_\Gamma; P_B\}, \quad (2)$$

где  $P_\Gamma$  и  $P_B$  – коэффициенты опасности в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно. В частности, когда  $P_\Gamma = 0$  и  $P_B = 0$ , общий коэффициент также равен нулю.

Однако это представление явно недостаточное, если значения  $P_\Gamma$  и  $P_B$  отличны от нуля. В данной работе в нужных случаях предлагается его улучшенная модификация, использующая понятие об обратных величинах:

$$\frac{1}{P_\Sigma} = \frac{1}{P_\Gamma} + \frac{1}{P_B}$$

или

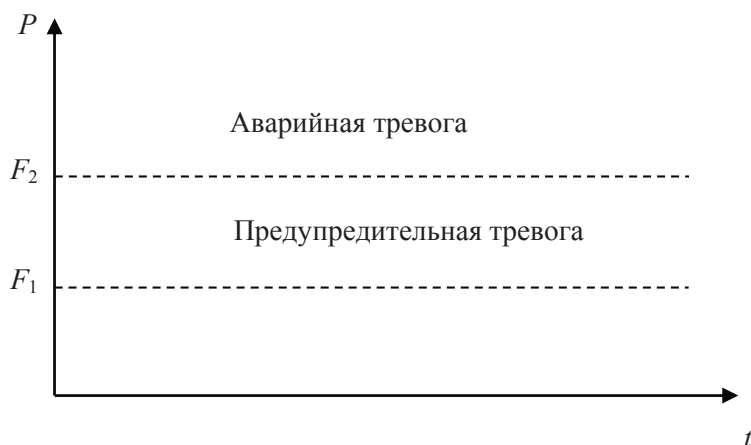
$$P_\Sigma = \frac{1}{\frac{1}{P_\Gamma} + \frac{1}{P_B}}. \quad (3)$$

Эта формула повторяет ответ: если при  $P_\Gamma = 0$  или  $P_B = 0$  величина  $P_\Sigma = 0$ , то при  $P_\Gamma \neq 0$  и  $P_B \neq 0$  она способна различать неодинаковые опасности и тем самым более качественно скомпенсировать действие различных факторов.

Нужно подчеркнуть, что требуемое время  $\tau_k$  на исправление опасной ситуации зависит от выбранного способа устранения угрозы – при обычном штатном управлении оно значительно, при оптимальном управлении по быстрдействию – мало. Поэтому в данной работе предусматривается:

- на выходе алгоритма появляется двойная оценка функции риска в виде двух чисел  $P_\Gamma$  и  $P_B$  – при пессимистическом и оптимистическом прогнозе, что по существу

определяет минимум и максимум ожидаемого риска. Эти числа являются либо безразмерными, либо соотнесенными к максимально ожидаемому ущербу аварийного развития событий. Эти числа у всех алгоритмов имеют одинаковую физическую размерность и сами по себе являются сверткой опасных локальных отклонений от траектории посадки;



**Рис. 1.** Границы трехзначной оценки степени опасности частной угрозы  
**Fig. 1.** The boundaries of three-digit hazard assessment of a private threat

– полученный результат вычислений сравнивается с двумя порогами опасности  $F_1$  и  $F_2$ , которые определяют трехзначное понимание опасности, как показано на рис. 1.

При этом совершенно очевидно, что сами оценки  $F_1$  и  $F_2$  характеризуют прогнозируемый риск в предстоящем будущем.

Дальнейшее сравнение этих оценок с назначенными границами позволяет выбрать нужную попытку своевременного вмешательства при уклонении от опасного сближения двух ВС.

При опасном сближении

большого, чем 2-а ВС, нужно иметь в виду, что в этом случае на полет влияет множество факторов, но таких, что если хотя бы один фактор представляет серьезную угрозу (коэффициент ее опасности  $P_i = 1$ ), то и общий коэффициент  $P_\Sigma$  также равен единице. Этой ситуации соответствует формула комплексирования

$$P_0 = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_\Sigma(i)], \quad (4)$$

где  $P_0$  – общий коэффициент опасности при сближении нескольких ВС.

Таким образом, предложенный единый подход к количественной оценке в свертке коэффициентов опасности как от каждой угрозы, так и при их одновременном появлении учитывает прогноз последствий, а также отношение располагаемого времени к требуемому для предотвращения угроз.

### ОПИСАНИЕ ЧАСТНОГО АЛГОРИТМА КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА ПРИ ВСТРЕЧЕ С ДРУГИМИ ВС, ЛЕТЯЩИМИ НА ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ КУРСАХ

При сближении основного судна с одним ВС возможны 4 случая принятия решений:

- ситуация сближения в окрестности SPA (по обзорному радиолокатору) не является опасной ни по горизонту, ни по высоте, и в этом случае никаких активных действий не предпринимается;
- опасность ситуации легко ликвидируется, если основному  $BC_0$  изменить эшелон высоты полета за весьма малое время не более 30 секунд;
- предотвратить опасность за счет эшелонирования нельзя по ряду причин, и поэтому предпринимается боковое уклонение в горизонтальной плоскости;
- для устранения угрозы нужно двойное уклонение как в боковом, так и продольном движении.

Для каждого из перечисленных случаев были получены формулы двойной оценки, а именно:

$P_r$  – коэффициент опасности при отсутствии бокового маневрирования в горизонтальной плоскости;

$P_r^*$  – коэффициент опасности при активном боковом маневрировании для уклонения от точки встречи;

$P_b$  – коэффициент опасности при отсутствии активных действий по высоте полета;

$P_b^*$  – коэффициент опасности при изменении эшелона.

Более конкретно найденные формулы имеют следующий вид.

Случай сближения ВС<sub>0</sub> с другим ВС<sub>1</sub> на одной высоте:

- при отсутствии активных действий:

$$P_r = \frac{\mu_0 R_0^2}{Z_k^2 \left( 1 + \frac{r_1}{r} N_1 \right)}, \quad (5)$$

где  $\mu_0 = 0,05$ ;  $R_0^2 = 6000$ ;  $N_1 = \sqrt{\frac{\varphi}{2(R_0 - Z_k)}}$ , а прогнозируемый промах  $Z_k$  в SPA равен

$$Z_k = \begin{cases} r_1 \frac{\sin \varphi - \sin(\varphi - \Delta\Psi)}{\cos(360^\circ - \Delta\Psi)}, & \text{при } Z_k < 0; \\ r_1 \frac{\sin(360^\circ - \varphi) - \sin(\varphi + 180^\circ - \Delta\Psi)}{\cos \Delta\Psi}, & \text{при } Z_k \geq 0, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\varphi$  – угол пеленга ВС<sub>1</sub>,  $\Delta\Psi = \Psi_1 - \Psi_0$  – разность курсов;

- при активных действиях, начиная с текущего момента времени:

$$P_r^* = \frac{\mu_0 R_0^2}{\left( Z_k + \frac{a}{2} \left( \frac{r_1}{r} \right)^2 \right)^2}, \quad (7)$$

где  $a$  – максимальное боковое ускорение ВС<sub>0</sub>.

Случай сближения ВС<sub>0</sub> с другим ВС<sub>1</sub> при перелете из одного эшелона высоты в другой:

- при отсутствии активных действий:

$$P_b = \frac{\mu_1 \Delta H_0^2}{h_k^2 \left( 1 + \frac{r_1}{r} N_2 \right)}, \quad (8)$$

где  $\mu_1 = 0,1$ ;  $\Delta H_0 = 300$ ;  $N_2 = \frac{V_b}{\Delta H_1}$ ;  $\Delta H_1 = Y_1 - Y_0$ , а прогнозируемый промах  $h_k$  по высоте в SPA равен

$$h_k = \begin{cases} r_1 \frac{\sin q - \sin(q - \Delta\theta)}{\cos(360^\circ - \Delta\theta)}, & \text{при } (Y_1 - Y_0) > 0; \\ r_1 \frac{\sin(360^\circ - q) - \sin(q + 180^\circ - \Delta\theta)}{\cos \Delta\theta}, & \text{при } (Y_1 - Y_0) \leq 0, \end{cases} \quad (9)$$

где  $q$  – угол места ВС<sub>1</sub>,  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0$  – разность углов наклона траекторий;

- при активных действиях, начиная с текущего момента времени:

$$P_B^* = \frac{\mu_1 \Delta H_0^2}{\left( h_k + V_{\text{вер}} \left( \frac{r_1}{r} \right) \right)^2}, \quad (10)$$

где  $V_{\text{вер}}$  – максимальная вертикальная скорость ВС<sub>0</sub>.

Различные случаи уклонения двух ВС от точки встречи оцениваются:

- без активных действий:

$$P_\varepsilon = \frac{2}{\frac{1}{P_B} + \frac{1}{P_\Gamma}}; \quad (11)$$

- при боковом маневре:

$$P_\varepsilon = \frac{2}{\frac{1}{P_B} + \frac{1}{P_\Gamma^*}}; \quad (12)$$

- при эшелонировании по высоте:

$$P_\varepsilon = \frac{2}{\frac{1}{P_B^*} + \frac{1}{P_\Gamma}}; \quad (13)$$

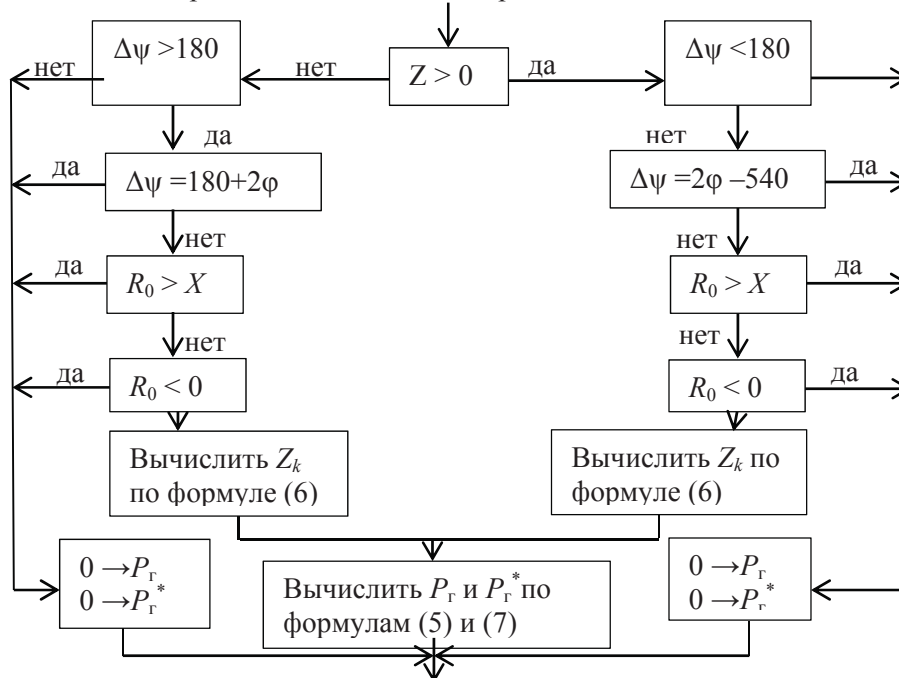
- при боковом и вертикальном маневре:

$$P_\varepsilon = \frac{2}{\frac{1}{P_B^*} + \frac{1}{P_\Gamma^*}}. \quad (14)$$

Полученные формулы экспертной оценки показывают, что по мере приближения коэффициенты опасности увеличиваются, что соответствует возникновению у лётчика ощущения растущей тревоги.

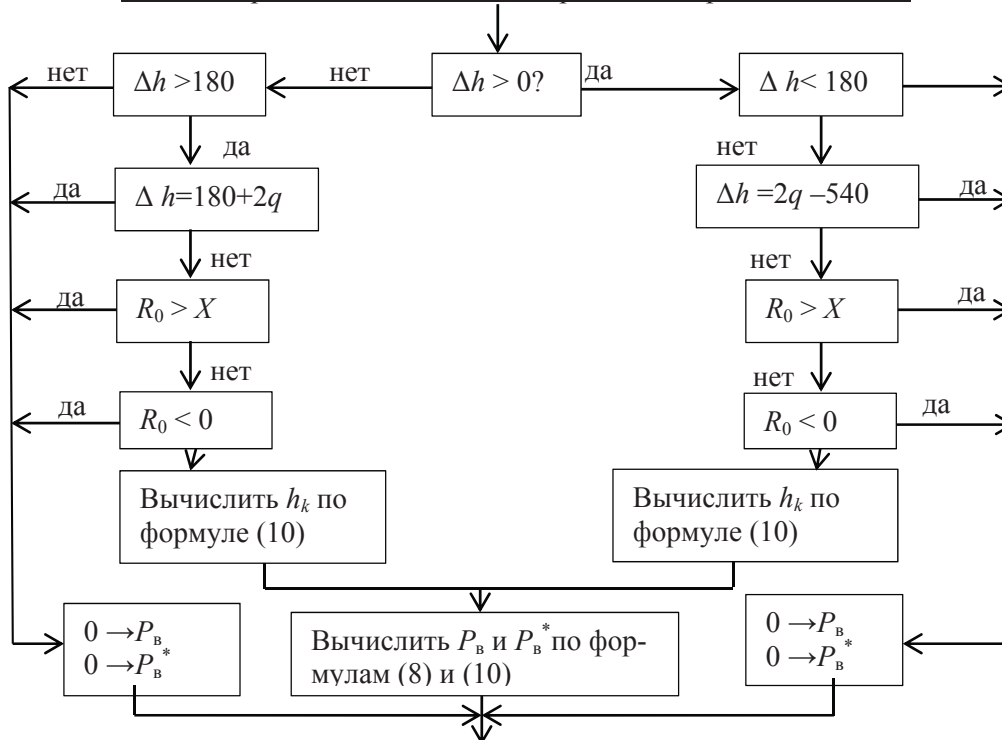
Анализ всех перечисленных случаев позволил сформировать алгоритм предупреждения и предотвращения угрозы столкновения с другим ВС, блок-схемы которого представлены на рис. 2 (а, б, в).

Блок 1 запрета оценки опасности при полете на одной высоте

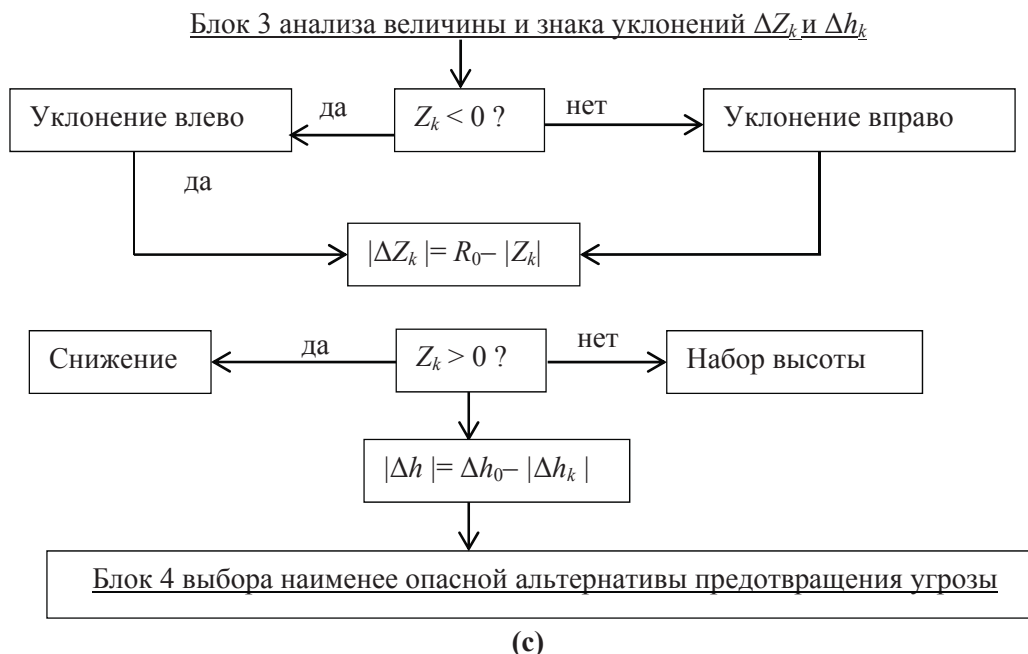


(а)

Блок 2 запрета оценки опасности при эшелонировании высоты



(б)



**Рис. 2.** Блок-схема алгоритма для вычисления коэффициентов опасности сближения с другими ВС при заходе на посадку, на этапе предупреждения и выбора альтернативы уклонения, на этапе предотвращения угрозы

**Fig. 2.** The flow chart of the algorithm for computing the dangerous coefficients of near miss during landing on the stage of warning and choosing an avoidance alternative on the stage of threat prevention

Согласно этой схеме возможны следующие варианты:

- когда точка опасной встречи вообще отсутствует из-за определенного сочетания курсовых углов;
- когда судно-нарушитель  $BC_1$  находится либо слева, либо выше основного  $BC_0$ ;
- положения  $BC_1$  правее или ниже.

Для каждого из этих вариантов нужно использовать различные формулы расчета коэффициентов опасности  $P_\Gamma, P_\Gamma^*, P_B, P_B^*$ , описание которых дано выше.

В завершение коэффициент опасности  $P_\Sigma$  вычисляется и запоминается, и если полученный результат превышает нужный порог, то предпринимаются меры по выбору способа уклонения от двух угроз. В качестве примечания нужно указать, что показанным на рис. 2 блокам 1 и 2 «запрета» соответствуют условия, когда маршруты сближающихся судов вообще не пересекаются вплоть до прогнозируемого момента приземления основного  $BC_0$ , и эти условия анализируются.

Также очевидно и то, что среди всех четырех анализируемых ситуаций предотвращения угрозы выбирается та, у которой ожидаемый коэффициент опасности минимален.

### ОПИСАНИЕ БОРТОВОЙ ПРОГРАММЫ-ДИСПЕТЧЕРА КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ НЕСКОЛЬКИХ УГРОЗ

Для интегральной оценки опасности возникновения нескольких воздушных угроз в данной работе предложено использовать специальную бортовую программу-диспетчер.

Её общая структура, показанная на рис. 3, содержит совокупность частных алгоритмов предупреждения угроз, имеющих на своем выходе ответы подобного содержания – оценку величины ожидаемого, минимизируемого риска и выбранную альтернативу уклонения от точки встречи. На рис. 3 –  $i$  – номер шага по времени,  $m$  – номер анализируемой угрозы,  $j$  – номер альтернативного способа ее предотвращения.



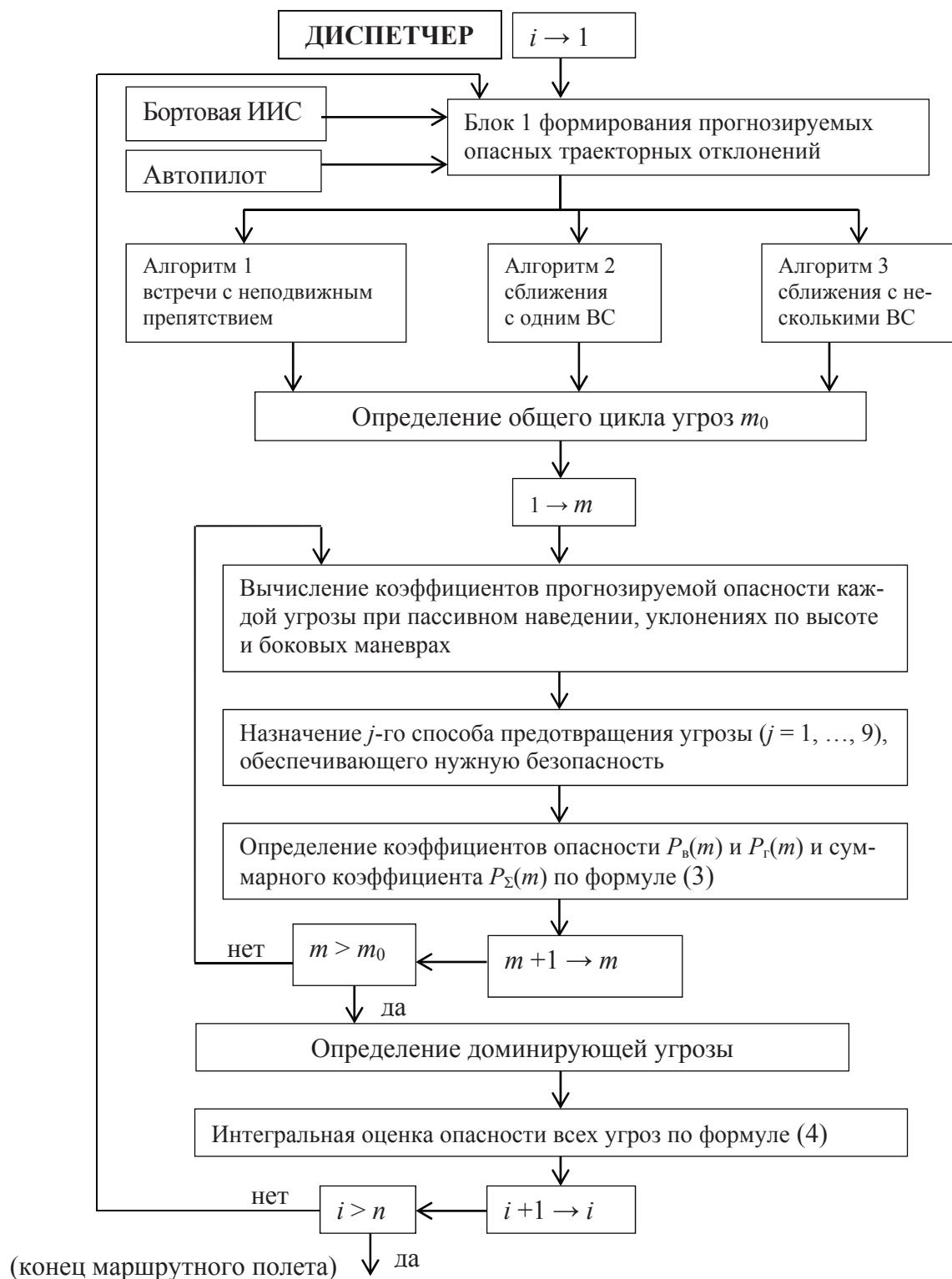


Рис. 3. Блок-схема бортовой программы-диспетчера при автоматическом контроле безопасности полета  
Fig. 3. The onboard program-manager flow chart with the automatic flight safety check

Полученные ответы от всех алгоритмов позволяют:

- определить общее число угроз;
- автоматически установить доминирующую угрозу;
- получить интегральную количественную оценку опасности всех угроз и представить экипажу динамику её изменения в виде меняющейся шкалы.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ В СРЕДЕ SIMULINK

При компьютерном моделировании системы [9, 10] рассмотрено два случая сближения основного судна  $BC_0$  с одним и двумя ВС.

В первом случае получены результаты моделирования для случая сближения в горизонтальной плоскости двух судов – основного  $BC_0$  и нарушителя  $BC_1$ .

Рассмотрено три варианта поведения системы на этапе предотвращения угрозы:

- при «пассивном» поведении в отсутствие действий по уклонению от точки встречи;
- при «активном» уклонении, прогнозируемом при допущении, что оно начнётся с текущего момента времени и до конца сближения;
- при «активном» управлении с самого начала обнаружения угрозы до текущего момента и прогнозируемом затем уклонении до конца сближения.

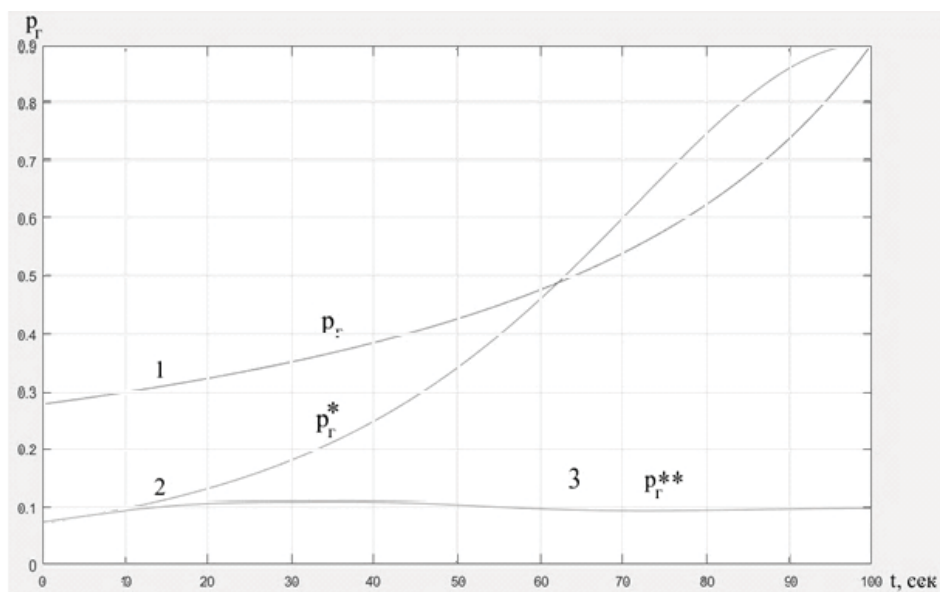


Рис. 4. Поведение коэффициента опасности при сближении с одним нарушителем  
Fig. 4. The dangerous hazard coefficient behavior during proximity with one offender

Исходные данные моделирования выглядят упрощенно следующим образом:

- начальная дальность между ВС равна  $r_0 = 3000$  м;
- скорость сближения задана постоянной и  $\dot{r} = 30$  м/с;
- максимальное боковое ускорение  $a = 2$  м/с<sup>2</sup>;
- допустимая безопасная дистанция между ВС  $R_0 = 6000$  м;
- начальный угол пеленга  $\varphi_0 = 60^\circ$ ;
- разность курсов  $\Delta\psi = 240^\circ$ ;
- судно-нарушитель  $BC_1$  сближается слева от основного судна  $BC_0$ .

В результате моделирования были получены графики, представленные на рис. 4.  $BC_1$  при пассивном (1) и активном (2) прогнозируемом поведении основного судна  $BC_0$ , начинающего совершать уклонение от точки встречи в текущий момент времени, а также при активном (3) поведении сразу после обнаружения  $BC_1$

Кривая 1 соответствует случаю «пассивного» поведения. Видно, что коэффициент опасности  $P_T \geq 0,3$  весьма велик и постепенно нарастает, т. к. вычисленная на компьютере текущая оценка ожидаемого промаха в *SPA* опасно мала и равна  $Z_k = 2000$  м при гарантированной –  $R_0 = 6000$  м.

Кривая 2 для случая прогнозируемого активного уклонения явно ниже кривой 1, однако и она возрастает по мере сокращения располагаемого времени на маневрирование в конце сближения.

График показывает, что коэффициент опасности в целом весьма мал на всём промежутке времени, т. е. уклонение от точки встречи выполнено успешно.

В целом можно сделать вывод, что при своевременном активном управлении можно устранить возникающую угрозу опасного сближения судов.

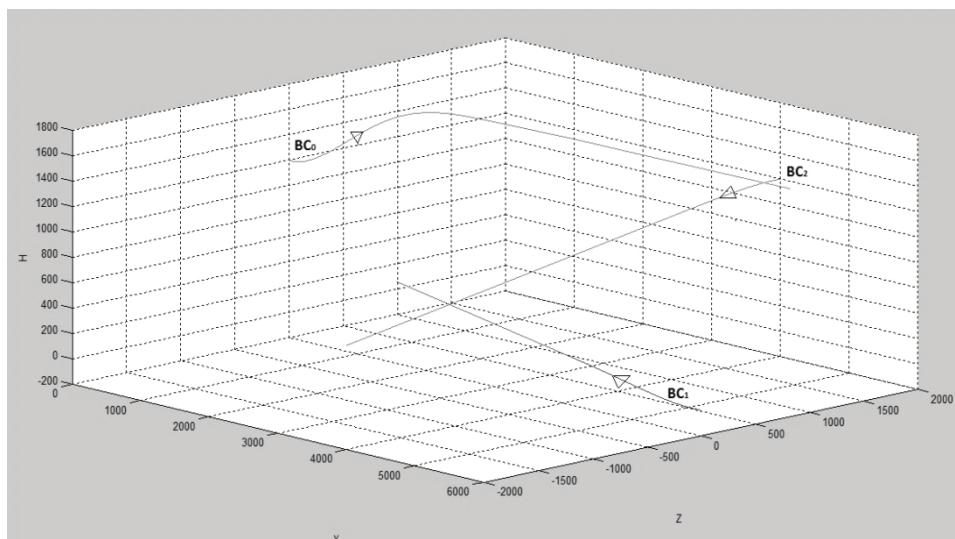


Рис. 5. Картина сближения воздушных судов при их продольном и боковом движении  
Fig. 5. The aircraft proximity pattern during their longitudinal and lateral movement

В качестве замечания следует также указать, что для успешного решения задачи уклонения нужно использовать особое правило выбора направления уклонения:

- если судно-нарушитель сближается слева от основного судна  $BC_0$  и «не долетает» до точки встречи, то нужно совершить уклонение вправо, а если оно эту точку встречи «перелетает», то нужно совершить уклонение влево;
- если судно-нарушитель сближается справа от основного судна  $BC_0$  и «не долетает» до точки встречи, то нужно совершить уклонение влево, а если оно эту точку встречи «перелетает», то нужно совершить уклонение вправо.

Во втором случае исследование проводилось при сближении трех судов – основного судна  $BC_0$ , летящего прямолинейно на одной высоте, судна-нарушителя  $BC_1$ , набирающего высоту после взлета, и судна-нарушителя  $BC_2$ , летящего на высоте полета  $BC_0$  на поперечном курсе.

Картина сближения трех судов в этом случае показана на рис. 5, при этом воздушные скорости полета воздушных судов различные.

При сближении с судном  $BC_1$  в продольной плоскости формула вычисления функции риска имеет следующий вид:

$$P_B = \frac{\Delta H_0^2}{\left(1 + \frac{1}{30} \frac{r}{r}\right) (|\Delta H| + 0,1\Delta X)^2},$$

где  $\Delta H_0$  – безопасная высота 300 м,  $\Delta X, \Delta H$  – соответственно разность высот и удалений самолета, выполняющего взлет, и самолета-нарушителя.

Для начала рассматривался случай отсутствия маневра в вертикальной плоскости и при его наличии, чему соответствовал график изменения функции опасности, представленный на рис. 6.

Анализ рис. 6 позволяет сделать вывод о том, что маневр в вертикальной плоскости привел к уменьшению опасности сближения судна, штатно выполняющего заход на посадку, и судна-нарушителя. Существующий на рис. 6 всплеск коэффициента опасности при  $t = 20$  с, возникает из-за того, что в этот момент дальность между судами равна 2000 м (при безопасной дистанции 6000 м), хотя разность высот равна нулю, поэтому нужно совместно учитывать как высоту, так и попутное расстояние между воздушными судами.

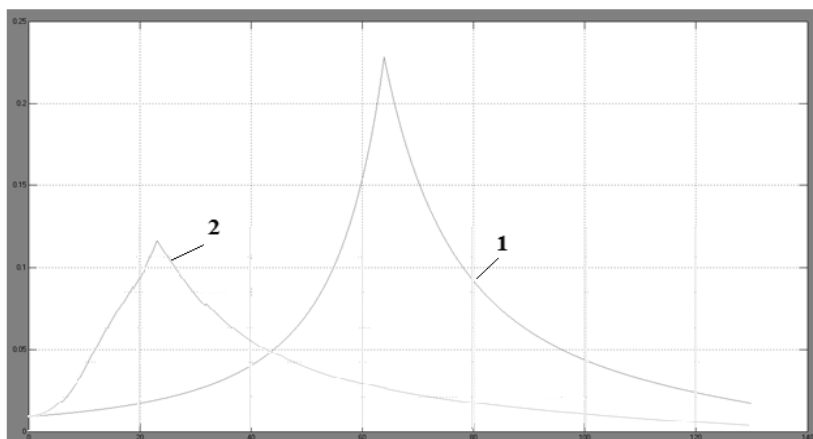


Рис. 6. График функции опасности при пассивном поведении ВС<sub>0</sub> (1) и при выполнении маневра в вертикальной плоскости (2)

Fig. 6. A graph of hazard function alteration during a passive behavior of AV<sub>0</sub> (1) and during a maneuver in the vertical plane (2)

Далее рассматривался случай опасного сближения при боковом движении ВС<sub>0</sub> и ВС<sub>2</sub>, когда траектории воздушных судов пересекаются в плане, как показано на рис. 7. Оба воздушных судна движутся с одинаковой путевой скоростью 100 м/с.

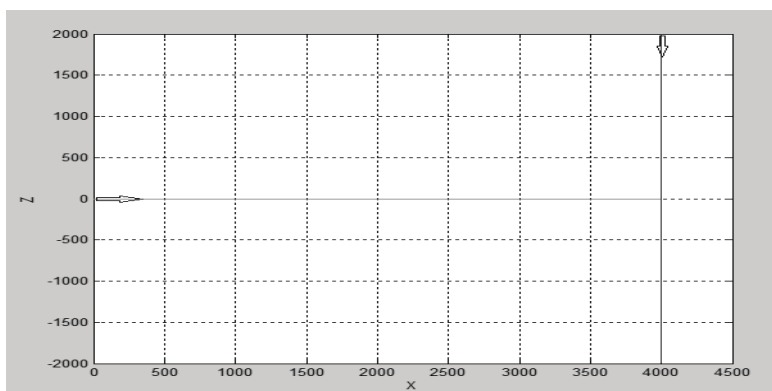


Рис. 7. Схема пересечения траектории воздушного судна ВС<sub>0</sub> и судна-нарушителя ВС<sub>2</sub>

Fig. 7. The intersection diagram of aircraft AV<sub>0</sub> trajectory and the aircraft-offender AV<sub>2</sub>

При отсутствии боковых маневров судами ВС<sub>0</sub> и ВС<sub>2</sub> функция опасности имеет вид, представленный на рис. 8.

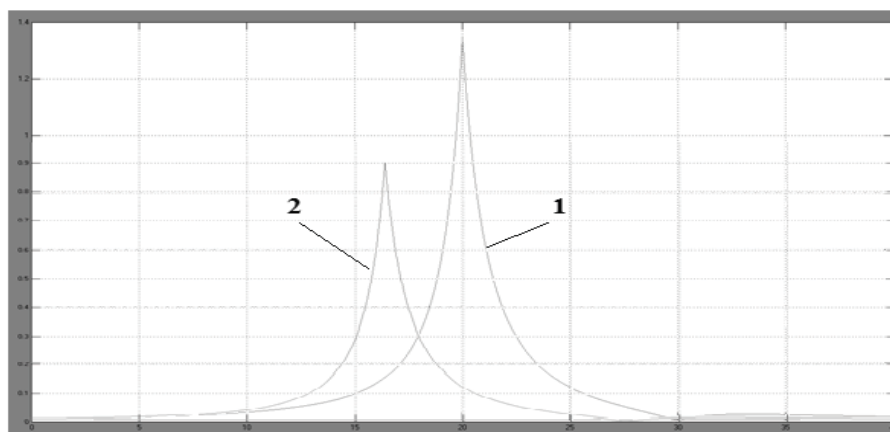


Рис. 8. График функции опасности при пассивном поведении (1) и при активном поведении (2)

Fig. 8. The graph of hazard function alteration with passive behavior (1) and active behavior (2)

Анализ результатов моделирования позволяет сделать важный вывод о том, что заранее выполненный маневр в вертикальной и боковой плоскости штатно выполняющим посадку воздушным судном приводит к уменьшению вероятности опасного сближения с другими судами, и в итоге при активном поведении коэффициент опасности принимает значение 0,9. Таким образом, интегральная оценка коэффициента опасности существенно снижается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования показано, что предложенный способ оценки полетной ситуации, основанный на вычислении в процессе полета коэффициентов опасности в горизонтальной и вертикальной плоскостях, дает возможность летчику принять оперативные меры в случае появления угроз в режиме захода на посадку. Представлены блок-схемы алгоритмов вычисления коэффициентов опасности в полете и программы-диспетчера при автоматическом контроле безопасности полета.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложен единый подход к количественной оценке в свертке степени опасности полета с учетом одновременного возникновения нескольких угроз.
2. Сформирован частный алгоритм определения коэффициентов опасности каждой отдельной воздушной угрозы при пассивном и активном поведении.
3. Создана первая версия функциональной модели системы в среде Simulink и проведено компьютерное моделирование в частных случаях, которое подтвердило её работоспособность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Нечаев Е.Е. Алгоритм назначения приоритетной очередности случайно расположенным в пространстве воздушным судам для выхода на стандартный маршрут прибытия // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 198. С. 31–36.
2. Управление полетом пассажирских самолетов при пересечении их маршрутов во время захода на посадку / Г.Н. Лебедев, П.Ч. Тин, М.Т. Зо, А.В. Медведев // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 63.
3. Blin K., Bonnans 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, 2001.
4. Лебедев М.И. Самолетовождение. Часть 1. Ставрополь, 2003.
5. Черный М.А., Кораблин В.И. Самолетовождение. М.: Транспорт, 1973.
6. Сарайский Ю.Н. «Джеппесен»: обеспечение качества аэронавигационной информации // Jeppesen GmbH. Neu-Isenburg. 2003.
7. Алешин Б.С., Афонин А.А., Веремеенко К.К. и др. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / под. ред. Б.С. Алешина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
8. Федеральные авиационные правила «Организация воздушного движения в Российской Федерации». Прибывающие и вылетающие суда, аэродромное диспетчерское обслуживание.
9. Гультияев А.К. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие. М.: КОРОНА принт, 1999.
10. Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2001. 448 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Михайлин Денис Александрович, к.т.н., доцент, доцент Московского авиационного института (НИУ), tau\_301@mail.ru.

## FLIGHT EXPERT RISK ASSESSMENT OF AIRCRAFT GROUP AT THEIR PROXIMITY USING A PROGRAM-MANAGER

Denis A. Mikhaylin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

### ABSTRACT

The paper presents an approach to solving the problem of aircraft flight safety. External threats in the form of aircraft-offenders are considered. The algorithm of collision danger coefficients with aircraft-offenders is presented, on the basis of which the side-program manager of flight safety monitoring is formed.

Two danger coefficients in the horizontal and vertical planes are introduced. Based on various flight situations four possible decisions are offered: absence of any aircraft activity, flight level change, deviation in the horizontal plane and both in vertical and horizontal planes. For each case the formulas of double evaluation are received. They take into account different parameters of aircraft relative motion. Based on these estimates it is possible to build a final expert evaluation for the considered flight situations. It is implemented in the onboard program-manager. The structure of the program is presented. At the program-manager output the expected minimized risk evaluation and the selected alternative of the avoidance of aircraft from the meeting point are formed. The paper presents a detailed description of the procedures to test the performance of the program-manager algorithms. The initial conditions for different flight situations are provided. The simulation results of the algorithm are given. The danger coefficients comparison when performing maneuvers to prevent dangerous approach and in their absence is illustrated. It is shown that the maneuver implementation recommended by program-manager algorithms decreases the resulting danger coefficient. Particular attention was paid to aircraft landing, especially if the landing area had several conflicting aircraft.

**Key words:** program-manager, flight safety, aircraft.

### REFERENCES

1. Lebedev G.N., Malygin V.B., Nechaev E.E. *Algoritm naznacheniya prioritetnoy ocherednosti sluchayno raspolozhennyim v prostranstve vozduzhnyim sudam dlya vyihoda na standartnyiy marshrut pribytiya* [The algorithm used to assign the priority sequence randomly located in space aircraft for exit to the standard arrival route]. The Scientific Bulletin of MSTUCA, 2013, no. 198, pp. 31–36.
2. Lebedev G.N., Tin P.Ch., Zo M.T., Medvedev A.V. *Upravlenie poletom passazhirskih samoletov pri peresechenii ih marshrutov vo vremya zahoda na posadku* [Flight control passenger aircraft crossing their routes during landing]. *Jelektronnyj zhurnal «Trudy MAI»*, 2013, no. 63.
3. Blin K., Bonnans 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, 2001.
4. Lebedev M.I. *Samoletovozhdenie. Chast' 1* [Flying. Part 1]. Stavropol', 2003.
5. Chernyj M.A., Korablin V.I. *Samoletovozhdenie* [Flying]. Moscow, Transport, 1973.
6. Sarajskij Ju.N. «Jeppesen»: *obespechenie kachestva ajeronavigacionnoj informacii* [“Jeppesen”: aeronautical information quality providing]. Jeppesen GmbH. Neu-Isenburg, 2003.
7. Aleshin B.S., Afonin A.A., Veremeenko K.K. *Orientacija i navigacija podvizhnyh ob'ektov: sovremennye informacionnye tehnologii* [Orientation and navigation of moving objects: modern information technology]. Pod. red. B.S. Aleshina, K.K. Veremeenko, A.I. Chernomorskogo. M., FIZMATLIT, 2006.
8. *Federal'nye aviacionnye pravila «Organizacija vozduzhnogo dvizhenija v Rossijskoj Federacii»*. *Pribyvajushhie i vyletajushhie suda, ajerodromnoe dispetcherskoe obsluzhivanie* [Federal aviation rules “Organization of air traffic in the Russian Federation”. Arriving and departing aircrafts, the aerodrome control service].
9. Gul'tjaev A.K. *MATLAB 5.2. Imitacionnoe modelirovanie v srede Windows: prakticheskoe posobie* [MATLAB 5.2. Simulation in Windows: practical guide]. Moscow, KORONA print, 1999.

10. D'jakonov V., Kruglov V. MATLAB. *Analiz, identifikacija i modelirovanie sistem. Special'nyj spravocnik* [MATLAB Analysis, identification and modeling of systems. Special reference]. SPb., Piter, 2001.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Denis A. Mikhaylin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Moscow Aviation Institute (National Research University), tau\_301@mail.ru.

Поступила в редакцию 28.02.2017  
Принята в печать 20.09.2017

Received 28.02.2017  
Accepted for publication 20.09.2017