



УДК 656.7.052

© 2020 г. **Н.И. Сельвесюк**, д-р техн. наук,

А.И. Еремин,

А.М. Кульчак

(Государственный НИИ авиационных систем, Москва),

Г.Н. Лебедев, д-р техн. наук

(Московский авиационный институт «Национальный исследовательский университет»)

ДВУХУРОВНЕВАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОПАСНЫХ ПОЛЕТНЫХ СИТУАЦИЙ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ*

Описан двухэтапный процесс обеспечения безопасности полета путем автоматического формирования сигналов предупредительной тревоги и предотвращения возникающей угрозы в сложных условиях. На первом этапе для количественной оценки формируется коэффициент уверенности продолжения полета, вычисляемый с помощью алгоритмов нечеткой логики при действии ряда негативных факторов. На втором этапе реализуются алгоритмы формирования предупреждающей информации экипажу либо алгоритмы автоматического управления ВС для основных этапов полета. В качестве примеров рассмотрены этапы посадки и маршрутного полета. На этапе маршрутного полета рассмотрена одна из наиболее сложных задач уклонения воздушных судов при их аварийном сближении. Сформирована база правил экспертной системы при раздельном либо совместном уклонении в боковом и продольном движении в зависимости от параметров относительного расположения воздушных судов.

Ключевые слова: оптимальное управление, метод динамического программирования, функция прогнозирующего риска, боковой ветер, сигналы тревоги.

DOI: 10.22250/isu.2020.65.87-101

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты №18-08-00079, №18-08-00463, № 20-58-53059-ГФЕН а.

Введение

Введение в практику эксплуатации воздушных судов (ВС) системы автоматического непрерывного контроля безопасности полета стало необходимостью по причине значительного числа летных происшествий, связанных с гибелью пассажиров и экипажа. Среди них, согласно статистике, более 60% причин аварий относится к человеческому фактору (включая действия экипажа и наземной диспетчерской службы) [1 – 5].

В свою очередь, в поведении экипажа можно указать две причины, приводящие к авариям:

не предоставление современной предупредительной информации о возникшей опасности;

неправильные действия по управлению полетом с целью предотвращения аварии, в первую очередь из-за дефицита располагаемого времени и недопустимой задержки в изменении режима полета.

Традиционный подход к решению проблемы устранения этих угроз предполагает наличие полной, определенной и достаточной информации, используемой по отдельности в различных подсистемах управления полетом с земли и с борта. Однако зачастую такие условия трудновыполнимы.

Необходимо отметить, что наиболее перспективные методы искусственного интеллекта позволяют решать задачи принятия решений в перечисленных условиях. Вместе с тем современные достижения в этой области ограничены, в основном, решением частных задач контроля безопасности при возникновении единичных угроз, в то время как аварийные ситуации обычно возникают при появлении нескольких угроз, действующих по принципу «домино».

В настоящее время известен широкий спектр подходов и технических решений для отдельных задач обнаружения и устранения опасности в полете, описанных в отечественных и зарубежных публикациях. Так, в [6] используется частный подход к шкальной качественной оценке опасности в одной из задач сближения воздушного судна с другим ВС, имеющим средства оповещения о своем местоположении и параметрах движения. Однако используемые оценки прогнозируют опасность с учетом кинематики, а не динамики полета, не способны ранжировать группу ВС по степени опасности, рассчитаны на достаточную полноту и достоверность информации от радиолокационных средств и средств информационного обмена между бортами.

Среди зарубежных публикаций особое место занимают подходы, основанные на идее использования глобальной системы зависимого наблюдения,

согласно которой наземные радиолокационные средства определяют параметры движения всех судов в нужных коридорах воздушного пространства и передают эту информацию всем судам. Однако научно обоснованные методы обработки данных, тем более при комплексировании с визуальной информацией, в иностранных источниках не упоминаются [7, 8]. Способы обработки такой информации и методы ее интеллектуального анализа не описываются, тем более с учетом требований оперативности предупреждения и предотвращения внешних угроз при сближении воздушных судов, особенно в условиях сближения судов беспилотной и пилотируемой авиации.

Поэтому назрела необходимость иметь на борту ВС «автоконтроллер безопасности полета», действующий в автоматическом режиме во внештатных ситуациях точно так же, как в штатном режиме «автопилот» может управлять полетом.

Целью данной работы является создание одного из подходов к разработке алгоритмов интеллектуальной системы непрерывного контроля безопасности воздушной и наземной обстановки для пилотируемой и беспилотной авиации.

Структура экспертной системы

При создании двухуровневой интеллектуальной системы предупреждения и предотвращения опасных полетных ситуаций в сложных условиях решаются следующие задачи:

- 1) формирование единого подхода к количественной оценке в свертке степени опасности полета с учетом одновременного возникновения нескольких внешних и внутренних угроз различной физической природы;
- 2) разработка концептуальной модели экспертной системы нечеткой логики, определяющей коэффициент уверенности выбранной меры устранения очередной угрозы, с учетом неопределенности условий полета;
- 3) разработка экспертной системы предотвращения опасных ситуаций для устранения возникающих угроз.

Общая двухуровневая структура системы автоматического предупреждения и предотвращения опасных полетных ситуаций показана на рис. 1.

Согласно этой структуре, система содержит ряд частных алгоритмов и состоит из двух уровней. На верхнем уровне на основе единого подхода к количественной оценке степени опасности с учетом угроз различной физической природы в блоке 1 вычисляется прогнозируемый коэффициент опасности $P(t)$ на всех этапах полета: разбега при взлете, самом взлете, маршрутном полете, заходе на посадку и посадке при снижении по глиссаде.



Рис. 1. Двухуровневая структура системы автоматического предупреждения и предотвращения опасных полетных ситуаций.

Таким образом, на верхнем уровне принятия решений согласно предложенному подходу формируется единая количественная оценка степени опасности продолжения полета на основе алгоритмов нечеткой логики. При этом считается, что действующие угрозы характеризуются количественными оценками, однако неполнота и неопределенность других факторов приводят к потребности их интеграции с помощью алгоритмов нечеткой логики, когда в условиях ограниченной ситуационной осведомленности требуется использовать множество функций принадлежности в виде качественных оценок.

На основе как количественных, так и качественных характеристик в блоке 2 определяется общий коэффициент $K(t)$ уверенности продолжения полета в штатном режиме. При достижении значения коэффициента заданных порогов $F_1(t)$ и $F_2(t)$ формируются сигналы предупредительной и аварийной тревоги соответственно (блок 3). Данные сигналы поступают на нижний уровень для своевременного предотвращения угроз. На этом уровне функционируют пять алгоритмов для каждого этапа полета, разработанные авторами статьи и описанные в [6], а именно:

в блоке 4 автоматически формируется «окно» разрешения на продолжение пробега с учетом ограниченной длины, в противном случае возникает команда экстренного торможения;

в блоке 5 при действии порыва бокового ветра формируется команда снижения скорости набора высоты и отказ от взлета по заданной линии пути, вместо этого – движение навстречу или против ветра;

в блоке 6 решается задача автоматического уклонения от сближения ВС друг с другом [9];

в блоке 7, с учетом ограниченного запаса топлива и сложности метеоусловий, формируется команда вынужденной посадки на ближайшем аэродроме [10];

в блоке 8 при снижении по глиссаде в сложных условиях формируется команда ухода на второй круг.

Среди перечисленных полетных ситуаций наиболее сложными и ответственными являются задачи посадки на уровне предупреждения опасности и уклонения от сближения ВС на уровне предотвращения аварийного сближения ВС. Эти задачи рассматриваются ниже более подробно.

При этом, в отличие от рассмотренной в [6, 9, 10] задачи контроля безопасности захода на посадку при учете ограниченного запаса топлива, отказов бортового оборудования и возможного сближения с другими ВС, в данной работе рассматривается задача посадки и соответствующий набор негативных факторов – ветровых возмущений, условий видимости места посадки и ошибок пилотирования при снижении по глиссаде.

Экспертная система нечеткой логики при контроле безопасности посадки в сложных условиях

Рассматривается продольное движение самолета при управлении высотой полета по заданной программе. Математическая модель продольного движения ВС при снижении по глиссаде описывается следующей упрощенной системой дифференциальных уравнений [11]:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2, \quad y_2 = H_0; \\ \dot{y}_2 &= -ay_2 + bU, \quad y_2 = 0; \\ \dot{x} &= -V, \quad x(0) > \frac{H}{\theta}, \end{aligned} \tag{1}$$

где y_1 – текущее фактическое значение высоты; y_2 – текущая вертикальная скорость; x – текущая дальность до точки приземления; U – синтезируемый сигнал управления; a и b – заданные коэффициенты при упрощенной динамике полета.

Считается, что все номинальные значения параметров полета ВС являются заданными, а эталонная траектория полета аппроксимируется кусочно-линейной функцией. Программа требуемого изменения высоты, полученная математическим моделированием в работе [11], приведена на рис. 2.

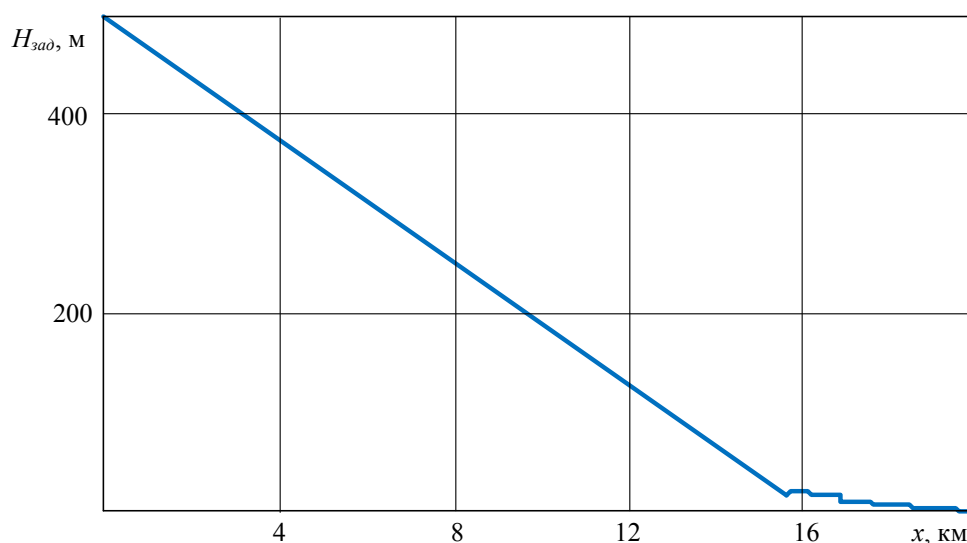


Рис.2. Программа изменения высоты полета при посадке.

Причины, препятствующие успешной посадке или ухудшающие условия посадки, обусловлены следующими негативными факторами:

сильные порывы ветра, турбулентность и ошибки пилотирования, приводящие к значительным отклонениям от линии заданного пути (ЛЗП) при директорном режиме полета;

критический или предельный запас топлива;

плохие условия видимости, которые экипаж, в частности, оценивает в дискретной шкале (норма, недостаточная видимость, плохая видимость).

В соответствии с подходом, изложенным в [10], могут быть заданы три нормированных параметра $X_l, l = 1, \dots, 3$, учитываемые далее при определении коэффициентов уверенности:

коэффициент опасности X_1 посадки при значительных отклонениях от номинальной траектории;

доля X_2 оставшегося топлива, в первую очередь предназначенного для посадки;

коэффициент сложности X_3 метеоусловий в месте посадки, включая видимость и действие ветровых возмущений.

Нормированные переменные X_l назначены так, что при их увеличении из-за возрастания опасности более вероятным становится отказ от выполнения посадки в заданном месте.

Необходимо выбрать одну из двух альтернатив принятия решений и определить при этом коэффициент d_j уверенности сделанного выбора

($j = 1, 2$): $j = 1$ – посадка осуществляется в штатном режиме; $j = 2$ – необходимо использовать возможность ухода на повторный круг.

Требуется сформировать единый подход к интегральной оценке степени опасности посадки с учетом влияния перечисленных факторов, сочетая как качественные, так и количественные оценки путем их комплексирования.

Количественные оценки прогнозирования степени опасности посадки

В работе [12] показано, что на этапе посадки ошибочные действия экипажа можно представить в виде двух событий – отклонения от глиссады при управлении продольным движением и отклонения от заданной линии пути при управлении боковым движением.

В продольном движении коэффициент опасности P_6 в вертикальной плоскости можно определить по формуле [12]

$$P_6 = \frac{M_1 \left[(y - H_{зад}) + k_1 (\Theta - \Theta_{зад}) + k_2 |w_6| \right]^2}{1 + \frac{(x - x_6)^2}{d^2}}, \quad (2)$$

где y – текущее значение высоты полета; $H_{зад}$ – заданное текущее значение высоты полета; Θ – текущий угол наклона траектории; $\Theta_{зад}$ – заданное постоянное значение угла наклона при снижении по глиссаде; w_6 – значение скорости вертикального ветра; x – координата продольного движения в горизонтальной плоскости; x_6 – координата точки начала выравнивания; M_1 , k_1 , k_2 , d – назначаемые экспериментальным путем коэффициенты.

В боковом движении коэффициент опасности P_2 в горизонтальной плоскости с учетом боковых отклонений из-за ошибок пилотирования и действия бокового ветра можно определить по формуле [12]

$$P_2 = \frac{M_2 \left[z^2 + k_3 (\psi - \psi_{зад}) \mathcal{V} + k_4 |w_6| \right]^2}{1 + \frac{(x - x_6)^2}{d^2}}, \quad (3)$$

где z – боковое линейное отклонение от ЛЗП; ψ – курсовой угол ВС; $\psi_{зад}$ – заданный курс, совпадающий с направлением ЛЗП; w_6 – значение скорости бокового ветра; M_2 , k_3 , k_4 , d – назначаемые экспериментальным путем коэффициенты.

Таким образом, в каждом из двух случаев учтено негативное действие двух факторов – начальной ошибки пилотирования и порыва ветра в соот-

ветствующий момент времени. Тогда, считая действие всех перечисленных факторов статистически независимыми, можно предложить следующий однозначный способ их комплексирования для определения общей оценки коэффициента опасности:

$$P_{\Sigma} = 1 - (1 - P_g)(1 - P_z). \quad (4)$$

Согласно (4), как только хотя бы один показатель P_g или P_z приближается к единице, общий коэффициент $P_{\Sigma} \rightarrow 1$ и, наоборот, – при $P_g = P_z \rightarrow 0$ общая опасность исчезает, что в целом соответствует физическому смыслу решаемой задачи.

По аналогии с [10] воспользуемся для решения поставленной задачи подходом на основе нечеткой логики с функциями принадлежности $\Phi_k(X_l)$, где k – номер терма, $k = 1, \dots, m$; l – номер переменной. Для функций принадлежности выполняется условие

$$\sum \Phi_k(X_l) = 1. \quad (5)$$

Кроме того, при одновременном учете нескольких переменных разных функций принадлежности в одной полетной ситуации общий коэффициент уверенности $\beta_{i(j)}$ продолжения посадки равен

$$\beta_{i(j)} = \prod \Phi_{kl}(j). \quad (6)$$

Каждая функция принадлежности состоит из трех кусочно-линейных терм ($m = 3$), назначенных с помощью экспертов. Каждой терме k соответствует свое понятие качества, а граничные интервальные точки a_l и b_l разделяют понятия «неопасно», «тревога» и «опасно» для любой из переменных l .

Например, при оценке уровня оставшегося топлива (для $l = 2$) функция принадлежности показана на рис. 3 [10].

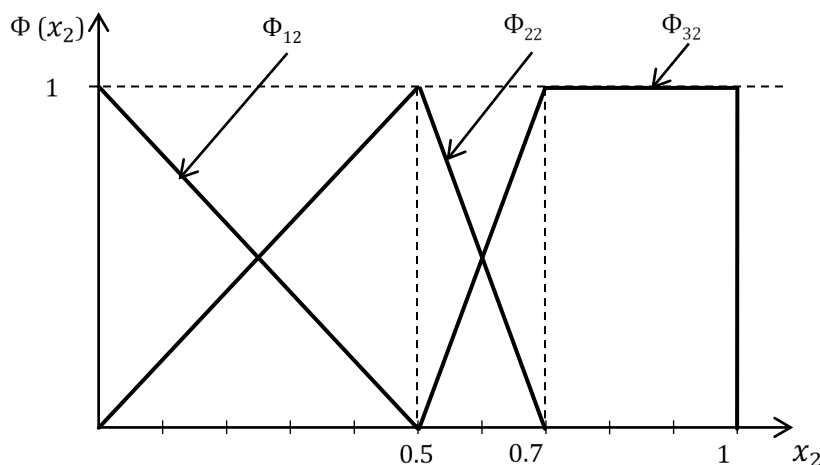


Рис. 3. Функция принадлежности оценки уровня остатка топлива.

Здесь: $\Phi_{12} = Z \rightarrow$ израсходовано очень мало топлива, его осталось много; $\Phi_{22} = M \rightarrow$ топлива немного; $\Phi_{32} = L \rightarrow$ много топлива израсходовано, осталось мало топлива; a_2, b_2 – назначаемые граничные интервальные точки.

Экспертная система нечеткой логики представлена на рис. 4. База правил составлена по методике, изложенной в [10]. Значения функций принадлежности формируются экспертами и являются входными параметрами в базу правил.

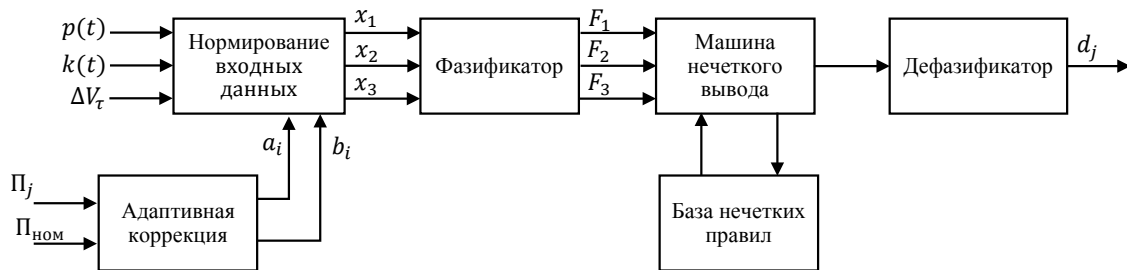


Рис. 4. Блок-схема экспертной системы нечеткой логики при выборе места посадки в опасных ситуациях.

На выходе блок-схемы вычисляется общий коэффициент уверенности d_1 в продолжении посадки в назначенном заранее месте

$$d_1 = (\Phi_{11} + \Phi_{12}) (\Phi_{21} + \Phi_{22}) (\Phi_{31} + \Phi_{32}). \quad (7)$$

Тогда на выходе экспертной системы появится сигнал в виде следующей убывающей оценки коэффициента уверенности d_1 в продолжении посадки (рис. 5).

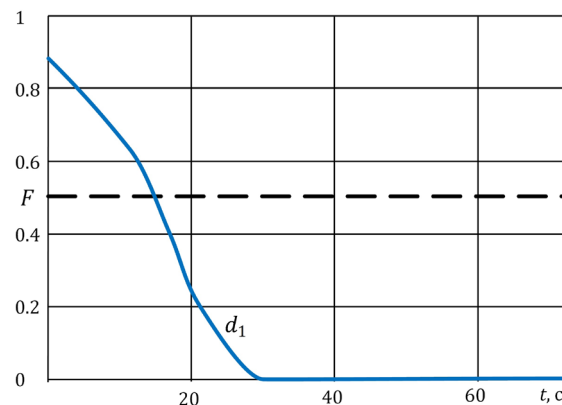


Рис. 5. График снижения коэффициента уверенности в продолжении посадки при росте опасности негативных факторов.

Сравнение коэффициента уверенности d_1 с порогом F позволяет сформировать сигнал предупредительной или аварийной тревоги.

Экспертная система формирования правил уклонения ВС от точки встречи при их сближении

Рассматривается случай сближения только двух судов (BC_0 и судно-нарушитель BC_1). Для работы экспертной системы необходимо определить коэффициенты опасности ρ_e и ρ_b сближения [13], вычисляемые на выходе системы автоматического предупреждения столкновения BC_0 и BC_1 , а также специальные параметры, характеризующие относительное пространственное положение ВС при сближении.

При определении коэффициентов опасности все множество полетных ситуаций разделяется на пять случаев, образующих полную группу событий:

- 1) при $\rho_z = \rho_\theta = 0$ либо при общем коэффициенте опасности $\rho_\Sigma = 0,05$ опасности нет, команды на уклонения отсутствуют;
- 2) при $\rho_\theta < 0,05$, но при $\rho_z > 0,1$ возможно опасное сближение при горизонтальном полете, вплоть до столкновения;
- 3) при $\rho_\theta < 0,05$, но при $\rho_z > 0,1$ возможно опасное сближение при вертикальном полете, когда два ВС, находясь на одной заданной линии пути (одно ВС при взлете, другое – в процессе прилета и захода на посадку), нуждаются в срочном уклонении;
- 4) при наличии своевременно установленной опасности по двум каналам управления боковым и продольным движением, но при возможном устранении этой опасности нужны уклонения одновременно в двух плоскостях движения (наиболее типичный случай);
- 5) при опасном сближении и ожидаемом столкновении в обеих плоскостях и остром дефиците располагаемого времени нужны экстренные уклонения, чтобы если не устранить, то существенно снизить риск столкновения ВС.

Таким образом, учет значений ρ_z , ρ_θ и ρ_Σ в начале работы системы автоматического предотвращения позволяет упростить дальнейший анализ полетных ситуаций [14]. Специальные параметры относительного расположения судов определяются по следующим правилам.

Параметр x_1 характеризует взаимное положение ВС в горизонтальной плоскости и является двухальтернативным, т. е. никаких других вариантов ситуаций нет ввиду очевидности информации

$$x_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } ВС_1 \text{ справа от } ВС_0; \\ -1, & \text{если } ВС_1 \text{ слева от } ВС_0. \end{cases} \quad (8)$$

Параметр x_2 определяет характер траекторий ВС в горизонтальной плоскости. Трехальтернативность параметра x_2 учитывает факт неизбежной погрешности в оценке знака промаха вблизи линии пути в этой плоскости.

$$x_2 = \begin{cases} 1, & \text{есть перелет } ВС_1 \text{ через линию пути } ВС_0; \\ -1, & \text{есть недолет } ВС_1 \text{ до линии пути } ВС_0; \\ 0, & \text{есть высокая вероятность столкновения.} \end{cases} \quad (9)$$

Параметр x_3 аналогичен по смыслу параметру x_1 и используется для характеристики взаимного положения ВС в вертикальной плоскости. Двухальтернативность параметра x_3 – следствие очевидности информации.

$$x_3 = \begin{cases} 1, & \text{ВС}_1 \text{ выше } ВС_0; \\ -1, & \text{ВС}_1 \text{ ниже } ВС_0. \end{cases} \quad (10)$$

Параметр x_4 аналогичен по смыслу параметру x_2 и используется для характеристики ситуации в вертикальной плоскости.

$$x_4 = \begin{cases} 1, & \text{есть перелет } BC_1 \text{ через линию пути } BC_0; \\ -1, & \text{есть недолет } BC_1 \text{ до линии пути } BC_0 \text{ по высоте;} \\ 0, & \text{есть высокая вероятность столкновения по высоте.} \end{cases} \quad (11)$$

Определенные в (8) – (11) параметры позволяют указать знак уклонения в горизонтальной и вертикальной плоскости (рис. 6).

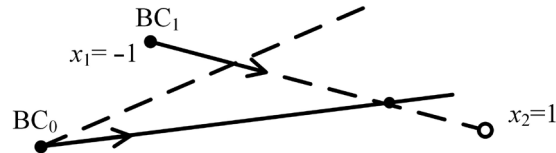


Рис. 6. Пример сближения двух ВС в точке встречи в горизонтальной плоскости.

Для обозначения характера уклонений ВС используются три специальных параметра:

$$y_1 = \begin{cases} 1, & \text{уклонение влево;} \\ 2, & \text{уклонение вправо;} \\ 0, & \text{уклонения нет.} \end{cases}$$

$$y_2 = \begin{cases} 3, & \text{лететь выше;} \\ 4, & \text{лететь ниже;} \\ 0, & \text{уклонения нет.} \end{cases} \quad (12)$$

$$y_3 = \begin{cases} 1, & \text{лететь в штатном режиме;} \\ -1, & \text{уклоняться в экстренном режиме.} \end{cases}$$

С использованием введенных специальных параметров можно закодировать варианты уклонений для каждой из пяти указанных выше полетных ситуаций. Для полетных ситуаций 1 и 2 список из восьми возможных вариантов уклонения с указанием для каждого из них четырех значений x_i и трех значений y_j представлен в табл. 1 и 2, где значения y_1 уклонений влево или вправо выделены особо как обязательные, а значения y_2 – как желательные.

В табл.1 и 2 приведены варианты уклонений соответственно в полетных ситуациях 1 и 2.

Таблица 1

i	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3
1	1	1	1	0	1	0	1
2	-1	1	1	0	2	0	1
3	1	-1	1	0	2	4	1
4	-1	-1	1	0	1	4	1
5	1	1	-1	0	1	3	1
6	-1	1	-1	0	2	0	1
7	1	-1	-1	0	2	3	1
8	-1	-1	-1	0	1	3	1

Таблица 2

i	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3
9	1	0	1	1	0	3	1
10	1	0	-1	1	0	4	1
11	1	0	1	-1	1	4	-1
12	1	0	-1	-1	1	3	-1
13	-1	0	1	1	0	3	1
14	-1	0	-1	1	0	4	1
15	-1	0	1	-1	2	4	-1
16	-1	0	-1	-1	2	3	-1

Для полетной ситуации 3 список из четырех ситуаций с указанием в каждой из них четырех значений x_i и трех значений y_j , кодирующих варианты двух уклонений, представлен в табл. 3.

Таблица 3

i	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3
17	1	0	1	0	2	4	-1
18	1	0	-1	0	1	4	-1
19	-1	0	1	0	2	4	-1
20	-1	0	-1	0	1	4	-1

Список из шестнадцати ситуаций с указанием рекомендуемых значений y_j представлен в табл. 4, которая завершает вместе с табл. 1 – 3 полную группу событий (всего 36), не считая ситуаций безопасного сближения, когда $\rho_2 = \rho_6 = 0$.

Таблица 4

i	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3
21	1	1	1	1	1	3	1
22	1	1	-1	1	1	4	1
23	1	1	1	-1	1	4	-1
24	1	1	1	-1	1	3	-1
25	-1	1	1	1	2	3	1
26	-1	1	-1	1	2	4	1
27	-1	1	1	-1	2	4	-1
28	-1	1	-1	-1	2	4	-1
29	1	-1	1	1	2	3	1
30	1	-1	-1	1	2	4	1
31	1	-1	1	-1	2	4	-1
32	1	-1	-1	-1	2	3	-1
33	-1	-1	1	1	1	3	1
34	-1	-1	-1	1	1	4	1
35	-1	-1	1	-1	1	4	-1
36	-1	-1	-1	-1	1	3	-1

Как видно из содержания значений y_j табл. 4, половину вариантов представляют рекомендации выполнения одиночных уклонений, зато другую половину при «недолетах» – парные уклонения в экстренном режиме.

Общая блок-схема экспертной системы показана на рис. 7, в которой процесс назначения уклонения реализуется в ряде блоков [15].

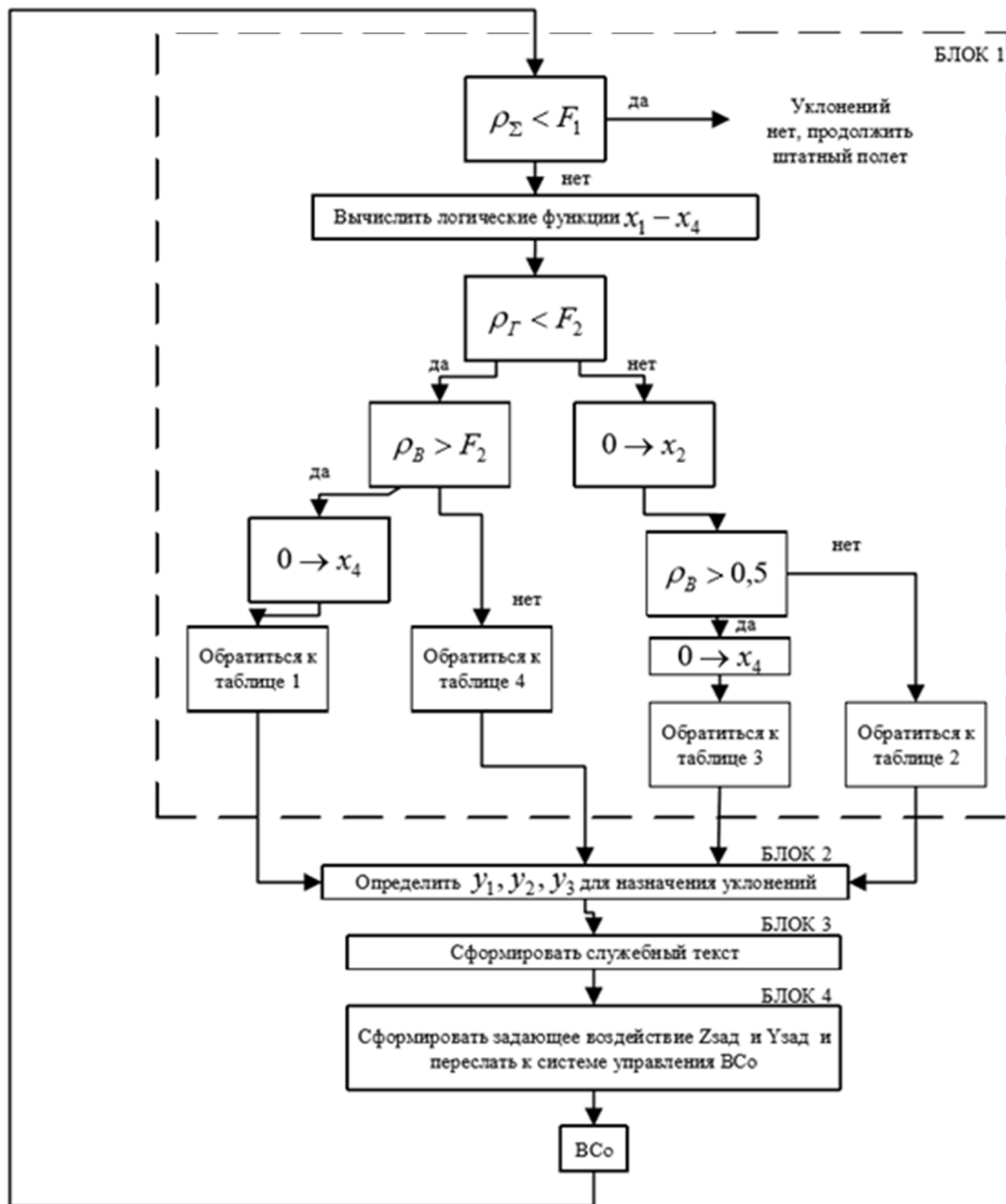


Рис. 7. Общая блок-схема экспертной системы назначения уклонений от опасной точки встречи.

В блоке 1 используются только коэффициенты опасности ρ_Σ , ρ_B и ρ_Γ , чтобы определить, в какую из пяти полетных ситуаций попало судно BC_0 и какую из четырех таблиц назначения использовать. Блок 2 предназначен для определения типов уклонений и их знаков. Блок 3 необходим для формирования служебного текста для экипажа, блок 4 – для определения новых задающих воздействий в регуляторы управления боковым движением и высотой полета.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

представлена двухуровневая структура автоматического предупреждения и предотвращения опасных полетных ситуаций при оценке возникающих угроз в количественной или качественной форме;

предложена экспертная система нечеткой логики для определения коэффициента уверенности в безопасном выполнении посадки при одновременном учете в реальном масштабе времени факторов опасного влияния ветровых возмущений, ошибок пилотирования, малого запаса топлива и сложных метеоусловий в заданном месте посадки;

предложенный подход является попыткой количественной оценки опасности вместо качественного ощущения нарастания тревоги при возникновении негативных факторов, что позволило путем сравнения коэффициента опасности с двумя порогами сформировать сигналы экстренного управления или ухода на повторный круг;

сформирована специальная экспертная система назначения уклонения от опасной точки встречи при сближении ВС, охватывающая в полной группе 36 событий либо в первую очередь при изменении эшелона высоты, либо с нужным отклонением по курсу при ручном управлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. *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. available at: URL: http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/DOC_Conf_2001_004.html.
2. *Солдаткин В.М.* Методы и средства построения бортовых информационно-управляющих систем обеспечения безопасности полета. – Казань: Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева, 2004.
3. *Pritchett A.R., Vandor B., Edwards K.* Testing and implementing cockpit alerting systems // Reliability engineering & system safety. – 2002. – No. 75(2). – P. 193-206. DOI:10.1016/S0951-8320(01)00094-1.
4. *Kuchar J.K., Walton D.S., Matsumoto D.M.* Integrating objective and subjective hazard risk in decision-aiding system design // Reliability engineering & system safety. – 2002. – No. 75(2). – P. 207-214.
5. *Elliot J.R.* NASA's Advanced Control Law Program for the F-8 Digital Fly-by-Wire Aircraft // IEEE Transactions on Automatic Control. Oct. – 1977. – Vol. AC-22, No. 5. – P. 735-757.
6. *Еремин А.И., Лебедев Г.Н., Чехов И.А.* Система автоматизированного предупреждения опасных ситуаций при заходе самолета на посадку перед началом снижения по глиссаде // Научный вестник МГТУ ГА. – 2016. – № 226(4). – С. 90-100.

7. *Marc D. Richards, Darrell Whitley, J. Ross Beveridge.* Evolving cooperative strategies for UAV teams. GECCO 2005 Washington, D.C. USA. P. 1–8. URL: <http://www.cs.colorado.edu/~genitor/2005/GECCO250.pdf>.
8. *He P., Dai S.* Stealth Real-time Paths Planning for Heterogeneous UAV Formation Based on Parallel Niche Genetic Algorithm // *Journal of Computational Information Systems.* – 2014. – P. 6731–6740.
9. *Лебедев Г.Н., Михайлин Д.А.* Экспертная система контроля безопасности группового полета, исключая возможные пересечения маршрутов // Тезисы докладов IV Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами». – М., 2019. – С. 338-339.
10. *Сельвесюк Н.И., Кульчак А.М., Лебедев Г.Н.* Экспертная система контроля безопасности захода на посадку воздушных судов с учетом отказов бортового оборудования и других негативных факторов // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2019. – № 7. – С. 200-213.
11. *Еремин А.И., Сельвесюк Н.И.* Уточненная оценка коэффициента опасности посадки при снижении по глиссаде с учетом действия вертикального ветра // *Труды МАИ.* – Вып. №100 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93451>.
12. *Сельвесюк Н.И., Еремин А.И., Лебедев Г.Н.* Оценка коэффициента опасности посадки при снижении по глиссаде с учетом ошибок пилотирования и действия бокового ветра // *Информатика и системы управления.* – 2019. – №4(62). – С. 35-44.
13. *Михайлин Д.А.* Экспертная оценка опасности полета группы воздушных судов при их сближении с помощью программы-диспетчера // *Научный вестник МГТУ ГА.* – 2017. – № 5. – С. 116-130.
14. *Петунин В.И., Неугодникова Л.М.* Ограничение и предупреждение опасных режимов при автоматическом управлении движением летательных аппаратов // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета.* – 2014. – № 4 (65). – С. 99-104.
15. *Лебедев Г.Н., Тин Пхо Джо.* Автоматизированная система управления и контроля безопасности попутного и поперечного движения группы воздушных судов при заходе на посадку // *Вестник Пензенского государственного университета.* – 2014. – № 1. – С. 72-80.

E-mail:

Сельвесюк Николай Иванович – nis@gosniias.ru;

Еремин Андрей Игоревич – aieremin@2100.gosniias.ru;

Кульчак Алексей Михайлович – amkulchak@2100.gosniias.ru;

Лебедев Георгий Николаевич – kaf301@mai.ru.