

УДК 621.735.33.015:519.86.681.3

МЕТОД И ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ «ВСТРОЕННОЙ» БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЁТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В СЛОЖНЫХ (МНОГОФАКТОРНЫХ) УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ СИТУАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И.Е. Бурдун

ООО «ИНТЕЛОНИКА»

Россия, 630009, г. Новосибирск, ул. Никитина, 15-76

E-mail: ivan.burdun@mail.ru

Ключевые слова: многофакторные ситуации, системные свойства безопасности полёта, ситуационное моделирование, вычислительный эксперимент, комплекс VATES, «встроенная» безопасность полёта, интеллектуальная система, база знаний, механизм принятия решений, виртуальное прототипирование

Key words: multifactor situations, system flight safety performance, situational modeling, computer simulation, VATES software, 'built-in' flight safety, intelligent system, knowledge base, decision-making mechanism, virtual prototyping

Представлен обзор метода и технологии повышения безопасности полёта летательного аппарата (ЛА) в сложных ситуациях, характеризующихся влиянием комплекса потенциально опасных эксплуатационных факторов. Основу разработанного подхода составляют системные знания о физике и логике полёта, полученные в результате ситуационного моделирования, и принцип «встроенной» безопасности полёта ЛА в многофакторных условиях. Используя примеры моделирования реалистичных ситуаций, излагаются основные понятия метода: событие, процесс, сценарий ситуации, палитра безопасности, нечёткое ограничение, интегральный спектр безопасности, ситуационное дерево, окно безопасности, «точка возврата», распределение шансов безопасности и др.

A TECHNIQUE FOR AIRCRAFT «BUILT-IN» SAFETY PROTECTION IN COMPLEX (MULTIFACTOR) CONDITIONS BASED ON SITUATIONAL MODELING AND SIMULATION / I.Y. Burdun (INTELONICS Ltd., 15-76, Nikitina Street, Novosibirsk, 630009, Russia, E-mail: ivan.burdun@mail.ru). A review of a generalized technique and its software implementation for aircraft flight safety enhancement in complex (multifactor) situations is presented. There are two key elements in the developed solution approach: (1) a knowledge base of flight physics and logic derived from modeling and simulation (M&S) data and (2) the principle of aircraft 'built-in' flight safety protection in multifactor conditions. Using M&S examples of realistic situations, a conceptual framework of the technique is introduced: event, process, situation scenario, safety palette, fuzzy constraint, integral safety spectrum, situational tree, safety performance window, safety «topology», safety chances distribution pie-chart, «last chance for recovery» point, and other.

1. Введение

Безопасность полётов – интегральная характеристика системы «оператор (лётчик, автомат) – летательный аппарат (ЛА) – эксплуатационная среда», оп-

ределяющая эффективность и пределы применения авиационной техники. Одной из ключевых задач современного этапа развития авиации является разработка методов и технологий искусственного интеллекта для повышения безопасности полётов в сложных условиях. Сложные условия полёта характеризуются действием в течение короткого промежутка времени (5... 30 с) комплекса эксплуатационных факторов, физически или логически связанных между собой. Результатом такого влияния является многофакторная полётная ситуация.

Эксплуатационные факторы, влияющие на безопасность полёта ЛА и эффективность выполнения полётного задания, включают следующие процессы:

- ошибки и невнимательность лётчика (человека-оператора);
- механические отказы (силовой установки, системы управления, шасси и др.);
- ошибки в данных и логике работы бортовых подсистем, в том числе автоматических устройств, влияющих на управление и динамику полёта ЛА;
- сильные ветровые воздействия (в том числе: порывы ветра, боковой, попутный и нисходящий ветер, «сдвиг ветра», «микровзрыв», «ротор» и др.);
- сильная турбулентность атмосферы, спутный след от другого ЛА;
- сильный дождь, ливневые осадки (влияние на аэродинамику и датчики ЛА);
- обледенение несущих поверхностей и поверхностей управления ЛА;
- нештатное состояние взлётно-посадочной полосы (ВПП): влажная, обледенелая, покрытая слоем воды или снега, неровная или подвижная ВПП;
- неблагоприятное состояние атмосферы (повышенная температура и др.);
- вариации массы, моментов инерции и положения центра масс ЛА в полёте;
- изменение аэродинамической конфигурации ЛА в полёте;
- искусственные и естественные препятствия, расположенные в воздухе и на земной поверхности, по траектории движения ЛА;
- нестандартные изменения профиля полёта и сценария управления ЛА;
- малые числа Рейнольдса (для малоразмерных ЛА);
- другие неблагоприятные воздействия эксплуатационной среды.

Для современного ЛА опасность представляет, как правило, не одиночный фактор из вышеприведенного списка, а сложный эффект взаимодействия комплекса таких факторов – неблагоприятное стечение обстоятельств («беда не приходит одна»). Многофакторные ситуации могут оказывать непредсказуемое влияние на внешние силы, действующие на ЛА, деятельность оператора, работу устройств автоматического управления, поведение системы в целом.

Глубинная причина лётных происшествий с современными ЛА состоит, на наш взгляд, в недостаточности знаний, доступных на борту ЛА, о физике и логике развития многофакторных ситуаций, особенно вблизи эксплуатационных ограничений и за ограничениями. Пробелы в системе знаний оператора (лётчика, инструктора, испытателя) о природе многофакторных ситуаций повышают риск спонтанного развития катастроф типа «цепная реакция» [1, 2]. Изучение таких ситуаций в лётных испытаниях, на пилотажных стендах, математических моделях затруднено ввиду комбинаторных и ресурсных ограничений. Знания об особенностях возникновения, протекания и разрешения многофакторных ситуаций могут выходить за рамки современных сертификационных и квалификационных требований. Тем не менее, несмотря на ничтожно малую расчетную вероятность возникновения, многофакторные ситуации встречаются в реальной эксплуатации ЛА и нередко приводят к катастрофам и инцидентам.

Для благополучного разрешения многофакторных ситуаций знаний и навыков оператора стандартной квалификации (штатного автомата управления) мо-

жет отказаться недостаточно. Для этих целей необходима разработка методов и технологий искусственного интеллекта. Искусственно интеллектуальное обеспечение безопасности полёта целесообразно иметь, прежде всего, на предельных режимах движения (по высоте, скорости, перегрузке, угловому положению), вблизи естественных и искусственных препятствий, при выполнении сложных пространственных маневров, в том числе в составе группы или «стаи» ЛА, при отказах бортового оборудования, воздействии неблагоприятных погодных условий, деградации и сбоях выполнения операторской функции.

Поиск надёжного и экономичного решения данной проблемы особенно актуален для беспилотных летательных аппаратов (БЛА) различного назначения. Беспилотные ЛА проектируются для выполнения сложных полётных заданий, которые характеризуются, по крайней мере, одним из трех условий: высокий риск повреждения или гибели аппарата; невозможность использования пилотируемых ЛА из-за ограничений, связанных с лётчиком (неприемлемо высокий риск для жизни или здоровья, ограничения по весу, габаритам, физиологии, информационной нагрузке и др.); сверхбольшая продолжительность полёта.

Проблема обеспечения безопасности полётов беспилотных ЛА имеет свои особенности, связанные с качеством данных, знаний и процессов принятия решений по управлению полётом в сложных условиях, а именно:

- объективное ограничение уровня компетентности оператора стандартной квалификации (штатного автомата управления) в области теории предельных режимов движения;
- недостаток на борту информации прогноза условий («предвестников») развития катастрофических и безопасных вариантов развития ситуации;
- неполнота или неточность данных о параметрах фактической эксплуатационной среды, в которой находится БЛА;
- отсутствие лётчика на борту БЛА, запаздывание или временное невыполнение внешней операторской функции;
- ограниченность или запаздывание информации о текущем состоянии БЛА;
- сбои в линии связи с оператором, зашумленность данных о состоянии БЛА.

Разработан обобщенный подход к решению задач анализа и обеспечения безопасности полёта пилотируемых и беспилотных ЛА в сложных условиях, характеризующихся влиянием комплекса потенциально опасных факторов. В основе подхода лежит постулат центральности знаний о физике и логике полёта («знание – сила») и принцип «встроенной» безопасности ЛА в многофакторных ситуациях и вблизи лётно-эксплуатационных ограничений. В работе используются методы и средства практической аэродинамики и динамики полёта ЛА, ситуационного моделирования, искусственного интеллекта, вычислительного эксперимента, компьютерной графики, виртуальной реальности и др.

В статье дается обзор теоретических основ метода. Вводится система понятий, используемых для моделирования, отображения, анализа и прогнозирования свойств безопасности многофакторного ситуационного пространства полёта [1-4]. Это событие полёта, процесс полёта, сценарий полётной ситуации, интегральный спектр безопасности, эксплуатационный фактор, эксплуатационная гипотеза, ситуационное дерево, окно безопасности полёта, динамическое окно безопасности, «топология» безопасности, «точка возврата», распределение шансов безопасности, характерные состояния динамики безопасности.

Метод доведен до уровня технологии, реализованной в виде программно-моделирующего комплекса (ПМК) VATES – Virtual Autonomous Test & Evaluation Simulator [5, 6]. Комплекс предназначен для прикладных исследований за-

дач динамики и безопасности полёта ЛА в многофакторных ситуациях. Показано, что ПМК VATES может использоваться при отработке элементов базы знаний и механизма принятия решений для прототипа интеллектуальной системы обеспечения безопасности полёта ЛА в сложных условиях применения.

Статья состоит из введения, трех основных разделов, заключения, списка литературы. В основных разделах освещаются следующие темы: система понятий, образующих формальную основу метода ситуационного моделирования полёта ЛА в многофакторных условиях, программно-моделирующий комплекс VATES, алгоритм системы «встроенной» безопасности полёта ЛА (излагается на примере анализа гипотетической ситуации «Маловысотный полёт условного беспилотного ЛА вблизи высотного объекта городской инфраструктуры»).

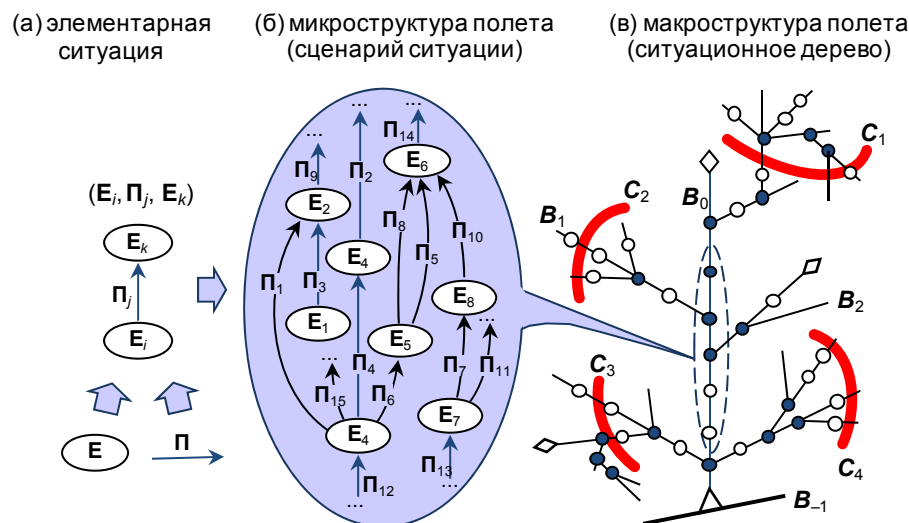
2. Метод ситуационного моделирования полёта ЛА в многофакторных условиях

В данном разделе рассматриваются основные понятия и отношения обобщённой ситуационной модели поведения системы «оператор (лётчик, автомат) – ЛА – эксплуатационная среда» (далее – система) [1-4].

2.1. Введение в двухуровневую модель знаний о полёте

2.1.1. Микро- и макроструктурные знания о полёте. Свойства динамики и логики поведения системы в многофакторных ситуациях моделируются на двух взаимосвязанных уровнях. Это «микроструктура» полёта (сценарий одинокрой ситуации) и «макроструктура» полёта (дерево родственных ситуаций).

Отношение между двумя этими структурами знаний показано на рис. 1.



2.1.2. Базовые элементы модели. Основу «микроструктурной» модели полёта образуют базовые элементы двух типов – событие и процесс (рис. 1). Эти формальные объекты представляют, соответственно, дискретные и непрерывные компоненты обобщённой модели полётной ситуации.

Событие полёта – это характерное состояние системы, важное для человека-оператора или автоматической системы управления ЛА с позиций планирования и выполнения сценария полёта. Процесс полёта характеризует непрерывный, длительный аспект поведения системы, имеющий отношение к одной из её подсистем: оператор, ЛА, эксплуатационная среда. В модели каждый процесс протекает между двумя событиями – исходным и конечным. Исходное событие открывает процесс в полёте, а конечное – его закрывает.

Тройка «исходное событие – процесс – конечное событие» образует элементарную ситуацию. Подмножество элементарных ситуаций, объединённых для моделирования некоторого этапа (участка) полёта, образует сценарий или план логики развития полётной ситуации. Сценарий ситуации удобно представить и анализировать в виде ориентированного графа (рис. 1).

На макроструктурном уровне моделирования изучается не одиночная ситуация, а множество родственных ситуаций, представленных в виде ситуационного дерева.

Ситуационное дерево – это множество альтернативных траекторий («полётов»), построенных вокруг некоторой базовой (опорной, центральной) ситуации – «ствола» дерева. Как правило, «ствол» дерева берёт начало из предыдущей фазы полёта. Сценарий базовой ситуации (базовый сценарий) может быть штатным или нештатным. «Крона» дерева образуется производными (нештатными) ситуациями – «ветвями» первого и более высокого порядков. Каждая производная ситуация моделируется согласно сценарию, который представляет собой параметрическую или структурную вариацию базового сценария (для ветви первого порядка) или модифицированного сценария предыдущего уровня (для ветви второго и более высокого порядков). Более подробное описание структурных элементов ситуационной модели дается ниже.

2.1.3. Опыт применения. Двухуровневая модель, изображенная на рис. 1, позволяет изучать ситуации практически любого уровня сложности для большинства видов маневров, этапов полёта, задач управления, полётных заданий для основных типов ЛА, в том числе дозвуковых, сверхзвуковых, гиперзвуковых, пилотируемых и беспилотных. Данная модель использовалась при решении задач динамики и безопасности полёта для 32 типов и проектов ЛА и более 500 типов сценариев ситуаций.

Опыт показывает, что концепции сценария полётной ситуации и ситуационного дерева, представленные на рис. 1, достаточно универсальны. Примеры моделирования и исследования различных одиночных полётных ситуаций и ситуационных деревьев можно найти в работах [1-4, 6, 7].

2.2. Микроструктурная модель

2.2.1. Измерение состояния системы. Поведение системы в некоторой ситуации, моделируемой в эксперименте или регистрируемой в полёте, описывается в виде хронологической последовательности состояний $\mathbf{x}(t)$,

$$(1) \quad \mathbf{x}(t) = \{x_1(t), \dots, x_i(t), \dots, x_{N(x)}(t)\},$$

где x_i – системная переменная, $x_i \in \mathbf{x}, t \in [t_*, t^*]$, $\mathbf{x}$ – вектор системных переменных, t – текущее полётное время, t_* и t^* – моменты времени, соответственно, начала и окончания ситуации, $N(\mathbf{x})$ – длина вектора.

Состояние безопасности полёта ЛА оценивают по результатам измерения значений подмножества ключевых системных переменных, входящего в вектор состояния $\mathbf{x}$.

2.2.2. «Полёт». Последовательность записей состояний вида (1) называется «полётом» F_k :

$$(2) \quad F_k = \{\{x_1(t_*), \dots, x_{N(x)}(t_*)\}, \dots, \{x_1(t_* + \Delta), \dots, x_{N(x)}(t_* + \Delta)\}, \dots, \{x_1(t^*), \dots, x_{N(x)}(t^*)\}\},$$

где n – количество записей вида (1) в F_k , $t^* = t_* + (n-1) \cdot \Delta$, Δ – шаг дискретизации данных по времени в множестве F_k .

2.2.3. Событие. Событие полёта E – это особое, характерное состояние системы, которое представляет важность для оператора с позиций существенно-го, резкого изменения в физике или логике ситуации. В ходе вычислительного эксперимента или полёта каждое событие из календаря (списка) возможных событий $\Omega(E)$ может находиться в одном из четырех состояний: «не распознано» (NR), «только что распознано» (R), «заморожено» (F) или «давно распознано» (P), то есть:

$$(3) \quad \Omega(E) = \Omega^{NR}(E) \cup \Omega^R(E) \cup \Omega^F(E) \cup \Omega^P(E).$$

События из календаря $\Omega(E)$ моделируются с помощью формального автомата перехода с четырьмя состояниями $\{NR, R, F, P\}$. Соответственно, внутренние границы множества (3) могут изменяться в течение ситуации.

2.2.4. Процесс. Процесс полёта Π описывает характерный длительный аспект поведения одной из трех составляющих системы: оператора, ЛА или эксплуатационной среды. В ситуационной модели определены следующие виды процессов: «динамика полёта» (D), «работа бортовой подсистемы» (B), «отказ бортовой подсистемы» (F), «задача пилотирования» (T), «наблюдатель состояния системы» (O), «процедура управления» (P), «процесс-программа» (H), «ветер» (W), «турбулентность» (L), «дождь, ливень» (R), «состояние поверхности ВПП» (Y), «состояние атмосферы» (A) и др.

Объединение процессов указанных выше видов, характерных для некоторой фазы полёта или группы ситуаций, образует список процессов $\Omega(\Pi)$:

$$(4) \quad \Omega(\Pi) = \Omega(D) \cup \Omega(B) \cup \Omega(F) \cup \Omega(T) \cup \Omega(O) \cup \Omega(P) \cup \Omega(H) \cup \Omega(W) \cup \Omega(L) \cup \Omega(R) \cup \Omega(Y) \cup \Omega(A) \cup \dots$$

2.2.5. Элементарная ситуация. В ситуационной модели с каждым процессом Π связываются два события: начальное E_* (открывает процесс в вычислительном эксперименте или полёте) и, возможно, конечное E^* (закрывает процесс). Тогда тройка s ,

$$(5) \quad s = (E_*, \Pi, E^*),$$

образует элементарную ситуацию, где $E_*, E^* \in \Omega(E), \Pi \in \Omega(\Pi)$. Отношение (5) означает, что процесс Π протекает между событиями E_* и E^* .

Подобно событиям, каждый процесс из списка $\Omega(\Pi)$ моделируется при помощи автомата перехода, имеющего четыре состояния: «не открыт» (NO), «открыт» (O), «заморожен» (F) и «закрыт» (C).

2.2.6. Сценарий ситуации. Группа событий и процессов полёта, которые логически связаны между собой отношениями s , имеющими общие списки событий и процессов, образует сценарий полётной ситуации S . Сценарий – это план, который задает содержание и логику полётной ситуации, то есть причинно-следственные, инструментальные, временные и другие отношения, определяющие поведение системы.

Сценарий S удобно представить в виде ориентированного графа:

$$(6) \quad S = \Omega(E) \cup \Omega(\Pi).$$

В графе (6) вершины – суть события из $\Omega(E)$, а ориентированные дуги – процессы из $\Omega(\Pi)$. Любая полётная ситуация, описанная в виде (6), может быть смоделирована в вычислительном эксперименте с ПМК VATES автономно, то есть без участия лётчика-исследователя, при помощи следующего алгоритма:

$$(7) \quad \begin{aligned} & (\forall S)(S = \Omega(E) \cup \Omega(\Pi))(\exists s)(s = (E_i, \Pi_j, E_k)) (E_i, E_k \in \Omega(E), \\ & \Pi_j \in \Omega(\Pi)) (\forall t)(t \in [t_*; t^*]) ((E_i \in \Omega^P(E) \wedge E_k \notin \Omega^P(E) \wedge \\ & \Pi_j \notin \Omega^C(\Pi)) \Rightarrow \Pi_j \in \Omega^A(\Pi)) \vee ((E_k \in \Omega^P(E) \Rightarrow \Pi_j \in \Omega^C(\Pi)), \end{aligned}$$

где $\Omega^A(\Pi)$ – множество «активных» процессов, $\Omega^A(\Pi) = \Omega^O(\Pi) \cup \Omega^F(\Pi)$ □

2.2.7. Базовый сценарий. В Руководствах по лётной эксплуатации ЛА, алгоритмах систем автоматического управления пилотируемых ЛА, программах автономного полёта беспилотных ЛА, программах лётных испытаний, программах обучения лётчиков представлены сценарии для весьма ограниченного набора базовых ситуаций. Это штатные и нештатные полётные случаи, которые, по мнению экспертов, могут встретиться в будущей эксплуатации ЛА и поэтому должны быть изучены и испытаны заблаговременно.

В базовых сценариях, как правило, задается влияние от одного до трех эксплуатационных факторов, имитирующих ожидаемые сложные условия эксплуатации. Например: отказ критического двигателя и (или) боковой ветер и (или) скользкая ВПП; обледенение ЛА и (или) ошибки пилотирования по тангажу и крену т.п.

2.2.8. Палитра безопасности. Цвет – естественный и весьма эффективный носитель информации о состоянии безопасности сложной динамической системы. С целью оценки текущего уровня безопасности полёта ЛА для ключевых переменных $x_i, x_i \in X$, определяется палитра безопасности π , включающая шесть основных цветов (рис. 2):

$$(8) \quad \pi = \{\xi_W, \xi_T, \xi_G, \xi_Y, \xi_R, \xi_B, \dots\}.$$

Или

$$(9) \quad \pi = \{\text{белый}, \text{серый}, \text{голубой}, \text{зеленый}, \text{желтый}, \text{красный}, \text{черный}, \dots\},$$

где $\xi_W \equiv (\square, \blacksquare)$, $\xi_T \equiv \text{голубой}$, $\xi_G \equiv \text{зеленый}$, $\xi_Y \equiv \text{желтый}$, $\xi_R \equiv \text{красный}$, $\xi_B \equiv \text{черный}$.

В палитре (8), (9) имеем:

- ξ_W – «белый» или «серый» цвет ($\square, \blacksquare$); ξ_W характеризует особые случаи – состояния системы типа «неопределённость или «неизвестность», в которых

выход значения переменной x_i за ограничения не контролируется – временно или постоянно, либо ограничение для этой переменной не задано;

- ξ_G – «зеленый» цвет (■); ξ_G представляет состояния системы типа «норма», для которых заведомо известно, что значения переменной x_i находятся в допустимых пределах;
- ξ_T – «бирюзовый» цвет (■); ξ_T представляет состояния типа «оптимум», в которых значения переменной x_i заведомо находятся в допустимых пределах и соответствуют максимальной безопасности или эффективности, измеренной по переменной x_i ;
- ξ_Y – «желтый» цвет (■); ξ_Y представляет состояния типа «внимание», в которых значения переменной x_i находятся на границе между допустимыми и недопустимыми областями; данный цвет используется для привлечения внимания оператора к факту приближения состояния системы к ограничению по переменной x_i ;
- ξ_R – «красный» цвет (■); ξ_R представляет состояния типа «опасность», для которых заведомо известно, что значения переменной x_i находятся в недопустимой области; данный цвет используется для привлечения внимания оператора к факту нарушения ограничений по переменной x_i ;
- ξ_B – «чёрный» цвет (■); ξ_B представляет состояния типа «катастрофа», когда полёт ЛА физически невозможен ввиду разрушения конструкции, либо действия другого обстоятельства непреодолимой силы (*force majeure*).

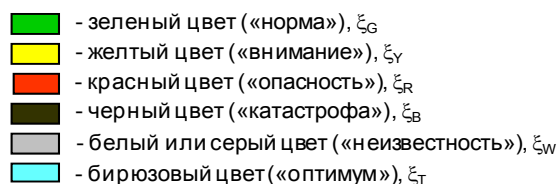


Рис. 2. Основные цвета (палитра) безопасности и их семантика.

Соответственно, для цветов безопасности из палитры π можно построить отношение порядка опасности:

$$(10) \quad \xi_W < \xi_T < \xi_G < \xi_Y < \xi_R < \xi_B,$$

или

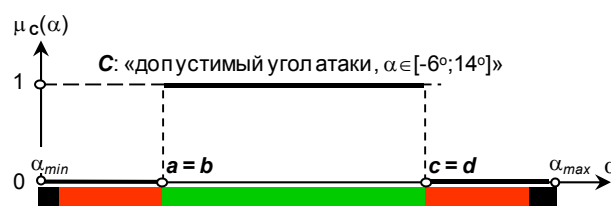
$$(11) \quad \square < \blacksquare < \blacksquare < \blacksquare < \blacksquare < \blacksquare.$$

В неравенстве (11) отношение $\xi_l < \xi_m$ означает, что цвет ξ_m , стоящий справа, «горячее», то есть более опасен для ЛА, чем цвет ξ_l , стоящий слева; $l, m \in \{W, T, G, Y, R, B\}$. Отношение $\xi_W < \xi_T$ основано на «мягком» допущении.

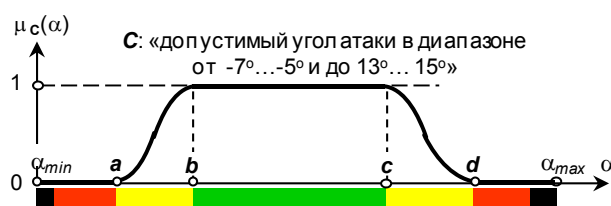
2.2.9. Нечёткое ограничение. Для обеспечения управления состоянием безопасности ЛА ключевые системные переменные должны контролироваться в полёте, а их значения могут быть ограничены. Для этих целей используется понятие «нечёткого ограничения» Л. Заде (рис. 3). Ввиду высокого уровня сложности современных систем практическая граница между опасными и безопасными значениями переменных $x_i, x_i \in \mathbf{x}$, как правило, точно не известна – «раз-

мыта». То есть, переход от полностью неприемлемого значения переменной x_i к полностью приемлемому значению происходит не скачком, а постепенно.

(а) детерминированное («точное») ограничение



(б) нечеткое («размытое») ограничение



Обозначения: α – переменная «угол атаки», [град]; a, b, c, d – характерные точки носителя нечеткого ограничения C , $\{a, b, c, d\} = \{-7^\circ, -5^\circ, 13^\circ, 15^\circ\}$; $\mu_C(\alpha)$ – функция принадлежности нечеткого множества-ограничения Л.Заде для переменной α ; $\alpha_{min}, \alpha_{max}$ – минимальное и максимальное значения переменной α ; ■, ■, ■, ■ – цвета палитры безопасности.

Рис. 3. Детерминированное («точное») и нечёткое («размытое») ограничения полёта (примеры).

В многофакторных ситуациях такая неопределённость может быть внутренним свойством реальной системы или процесса проектирования, то есть может иметь существенно не статистическую природу.

Из данных рис. 3 видно, что области определения ключевой переменной x_i существуют зоны частичной или неполной принадлежности значений $x_i(t)$ множеству-ограничению $C: \mu_C(x_i) \in [0; 1]$, где $\mu_C(x_i)$ – функция принадлежности значений переменной x_i к нечёткому множеству C (функция Л. Заде).

Характерные зоны-интервалы

$$(12) \quad [x_{i \min}; a), [a; b), [b; c], (c; d], (d; x_{i \max}],$$

на которые нечёткое ограничение C разбивает область определения переменной x_i , можно задать следующим образом:

$$(13) \quad \begin{aligned} [x_{i \min}; a) : x_i(t) \in [x_{i \min}; a) &\Rightarrow \mu_C(x_i) = 0, \\ [a; b) : x_i(t) \in [a; b) &\Rightarrow \mu_C(x_i) \in (0; 1), \\ [b; c] : x_i(t) \in [b; c] &\Rightarrow \mu_C(x_i) = 1, \\ (c; d] : x_i(t) \in (c; d] &\Rightarrow \mu_C(x_i) \in (0; 1), \\ (d; x_{i \max}] : x_i(t) \in (d; x_{i \max}] &\Rightarrow \mu_C(x_i) = 0. \end{aligned}$$

Примеры описания нечётких ограничений в виде (13) для ключевых системных переменных даются, в частности, в работах [1-4, 6].

2.2.10. Правило раскрашивания области определения переменной. Имея формальное определение палитры безопасности (8), (9) и семантику цветов

$\xi_k, k \in \{W, T, G, Y, R, B, \dots\}$, отношение (10) и результаты измерения состояния системы (1) в момент времени t , для каждой контролируемой системной переменной $x_i, x_i \in \mathbf{x}$, можно формализовать правило раскрашивания характерных зон (13) области её определения в цвета безопасности:

$$\begin{aligned}
 (14) \quad & x_i(t) \in [x_{i \min}; x_{i f1}] \cup (x_{i f2}; x_{i \max}] \Rightarrow \xi(x_i(t)) = \xi_B, \\
 & x_i(t) \in [x_{i f1}; a) \cup (d; x_{i f2}] \Rightarrow \xi(x_i(t)) = \xi_R, \\
 & x_i(t) \in [a; b) \cup (c; d] \Rightarrow \xi(x_i(t)) = \xi_Y, \\
 & x_i(t) \in [b; c] \Rightarrow \xi(x_i(t)) = \xi_G, \\
 & x_i(t) \in [x_{i opt1}; x_{i opt2}] \Rightarrow \xi(x_i(t)) = \xi_T, \\
 & x_i(t) \in \emptyset \Rightarrow \xi(x_i(t)) = \xi_W.
 \end{aligned}$$

Правило (14) связывает палитру безопасности (9) с характерными зонами нечётких ограничений (12). В практических приложениях метода это правило должно отражать требования норм лётной годности ЛА (или тактико-технических требований) и представления экспертов о допустимых, граничных и недопустимых состояниях системы. Крайние зоны области определения переменной x_i , если они заданы,

$$[x_{i \min}; x_{i f1}], (x_{i f2}; x_{i \max}],$$

могут определять катастрофические состояния по x_i , где $x_{i f1}, x_{i f2}$ – границы зон начала необратимых изменений в конструкции ЛА или подсистем, $x_i \in \mathbf{x}$. Отношение $x_i(t) \in \emptyset$ означает, что значения $x_i(t)$ неизвестны, то есть переменная x_i не регистрируется в наборе (2) в ходе полёта или эксперимента.

2.2.11. Спектры безопасности. С целью проведения качественного анализа динамики изменения уровня безопасности полёта, характеризуемого палитрой (9), вводятся понятия частного и интегрального спектров безопасности.

Частный спектр безопасности Σ_i – это линейное геометрическое сцепление штрих-кодов, окрашенных в цвета безопасности $\xi(x_i(t))$, построенное для переменной x_i на отрезке времени $[t_*; t^*]$ с шагом Δ согласно правилу (14) на основании данных из набора (2):

$$(15) \quad \Sigma_i = \xi(x_i(t_*)) \parallel \xi(x_i(t_* + \Delta)) \parallel \xi(x_i(t_* + 2 \cdot \Delta)) \parallel \dots \parallel \xi(x_i(t^*)),$$

где $\parallel$ – операция сцепления (конкатенации) штрих-кодов $\xi(x_i(t)), \xi(x_i(t)) \in \pi$, n – количество штрих-кодов $\xi(x_i(t))$ или точек измерения состояния системы по времени t , $x_i \in \mathbf{x}, t \in [t_*; t^*]$.

Чтобы построить частный спектр безопасности Σ_i , в каждый момент полёта t проверяют выход значений переменной x_i за нечёткое ограничение $C(x_i)$, заданное характерными точками $\{a, b, c, d\}$. Затем с помощью правила (14) устанавливают соответствие между текущим значением $x_i(t)$ и цветом $\xi(x_i(t))$ из палитры π , $t \in [t(E_*); t(E^*)]$, где E_* – начальное событие и E^* – конечное событие ситуации.

Например, если для некоторого «полёта» F_k согласно (14) в n точках $\{t_*, t_* + \Delta, t_* + 2 \cdot \Delta, \dots, t_* + 7 \cdot \Delta, \dots, t_* + (n-2) \cdot \Delta, t_* + (n-1) \cdot \Delta\}$ получены штрих-коды:

$$\begin{aligned} \xi(x_i(t_*)) &= \xi_W, \xi(x_i(t_* + \Delta)) = \xi_W, \xi(x_i(t_* + 2 \cdot \Delta)) = \xi_G, \\ \xi(x_i(t_* + 3 \cdot \Delta)) &= \xi_Y, \xi(x_i(t_* + 4 \cdot \Delta)) = \xi_R, \xi(x_i(t_* + 5 \cdot \Delta)) = \xi_Y, \\ \xi(x_i(t_* + 6 \cdot \Delta)) &= \xi_Y, \xi(x_i(t_* + 7 \cdot \Delta)) = \xi_G, \dots, \xi(x_i(t_* + (n-2) \cdot \Delta)) = \xi_G, \\ \xi(x_i(t_* + (n-1) \cdot \Delta)) &= \xi_G \}, \end{aligned}$$

то частный спектр безопасности на отрезке времени полёта от t_* до t^* , $t^* = t_* + (n-1) \cdot \Delta$, будет иметь вид:

$$\Sigma_i = \xi_W \parallel \xi_W \parallel \xi_G \parallel \xi_Y \parallel \xi_R \parallel \xi_Y \parallel \xi_Y \parallel \xi_G \parallel \dots \parallel \xi_G \parallel \xi_G.$$

Или в цветном обозначении:

$$(16) \quad \Sigma_i = \text{■} \text{■} \text{■} \text{■} \text{■} \text{■} \text{■} \text{■} \text{■} \dots \text{■} \text{■}.$$

Измерив текущие уровни безопасности по времени t для всех контролируемых переменных $x_i, i=1, \dots, p$, $t \in [t_*; t^*]$, получим семейство частных спектров безопасности вида (16), построенных на единой шкале времени $[t_*; t^*]$:

$$(17) \quad \Sigma_1, \dots, \Sigma_p.$$

На основе набора (17) можно сформировать единый цветовой образ, качественно характеризующий эволюцию состояния безопасности полётной ситуации во времени – «интегральный спектр безопасности».

Интегральный спектр Σ – это отображение $F_k \rightarrow \pi$, которое визуальнo характеризует изменение уровня безопасности ситуации («полёта») в целом, с учетом значений всех контролируемых переменных $x_i, x_i \in \{x_1, \dots, x_p\}$. Другими словами, интегральный спектр Σ – это обобщенная цвето-графическая картина изменения безопасности полёта на отрезке времени существования ситуации.

Интегральный спектр безопасности Σ строится согласно следующему обобщенному алгоритму [2]:

$$\begin{aligned} (\forall t)(t \in [t_*; t^*]) &(\exists \xi(x_i(t)))(x_i \in \{x_1, \dots, x_p\} \wedge x_i(t) \in F) \\ (\xi(x_i(t)) \in \{\xi_W, \xi_G, \xi_Y, \xi_R, \xi_B, \dots\}) &\wedge (\xi_W < \xi_T < \xi_G < \\ < \xi_Y < \xi_R < \xi_B) &(\xi(t) = \max \xi(x_i(t)), i=1, \dots, p) \Rightarrow \\ (\xi(t) \in \Sigma \wedge \Sigma = \xi(t_*) &\parallel \xi(t_* + \Delta) \parallel \xi(t_* + 2 \cdot \Delta) \parallel \dots \parallel \xi(t^*)), \end{aligned} \quad (18)$$

где p – количество контролируемых (ключевых) системных переменных x_i , то есть частных спектров безопасности Σ_i .

Из отношения (18) следует, что в интегральном спектре Σ фиксируются только наиболее опасные нарушения ограничений $C(x_i)$, допущенные по всем ключевым переменным $\{x_1, \dots, x_p\}$ в течение ситуации.

Суть алгоритма (18) состоит в следующем. Для каждого регистрируемого момента времени t из $[t_*; t^*]$ в интегральный спектр Σ заносится штрих-код, имеющий самый «горячий» цвет из всех цветов безопасности, зафиксированных на данный момент в частных спектрах Σ_i из набора (17).

Например, для условий

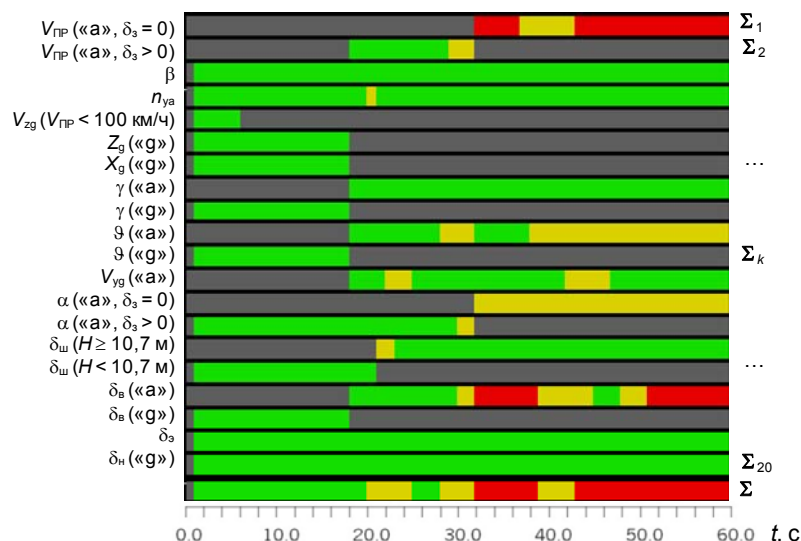
$$\begin{aligned} p=5 \wedge \xi(x_1(t)) &= \xi_G \wedge \xi(x_2(t)) = \xi_R \wedge \xi(x_3(t)) = \xi_W \wedge \\ \xi(x_4(t)) &= \xi_G \wedge \xi(x_5(t)) = \xi_Y \end{aligned}$$

в интегральном спектре Σ получим: $\xi(t) = \xi_R$ или $\xi(t) = \blacksquare$.

То есть, для данной ситуации в момент времени t в интегральном спектре Σ наибольшая опасность зафиксирована на «красном» уровне ξ_R по переменной x_2 : $\xi(t) = \xi(x_2(t))$.

Примеры построения и анализа спектров безопасности полёта ЛА приводятся в работах [1-4, 6].

Частные и интегральный спектры безопасности, построенные для нештатной ситуации взлёта и начального набора высоты ЛА в условиях «сильного» сдвига ветра, представлены на рис. 4.



Пояснения: $\blacksquare$ $\blacksquare$ $\blacksquare$ $\blacksquare$ – цвета безопасности; Σ_k – частный спектр безопасности для контролируемой переменной x_k , $k = 1, \dots, p$, $p = 20$; $x_k \in \{V_{пр}, \beta, n_{ya}, V_{zg}, Z_g, X_g, \gamma, \theta, V_{yg}, \alpha, \delta_{ш}, \delta_v, \delta_z, \delta_n, \dots\}$ – подмножество контролируемых переменных: $V_{пр}$ – приборная скорость, β – угол скольжения, n_{ya} – нормальная перегрузка, V_{zg} – боковая скорость, Z_g – удаление на восток (боковой увод), X_g – удаление на север, γ – угол крена, θ – угол тангажа, V_{yg} – вертикальная скорость, α – угол атаки, $\delta_{ш}$ – положение шасси, δ_v – положение руля высоты, δ_z – положение элеронов, δ_n – положение руля направления; δ_z – положение закрылков; H – высота полета; «а» – воздушный участок; «г» – наземный участок; Σ – интегральный спектр безопасности полета; t – полетное время.

Рис. 4. Частные и интегральный спектры безопасности полёта для ситуации F_{2782} : «Взлёт нормальный и начальный набор высоты ($\theta_{G1} = 16^\circ$, $\gamma_G = +22,5^\circ$) в условиях «сильного» сдвига ветра».

2.2.12. Категории безопасности полёта. Для измерения уровня безопасности полётной ситуации в целом, с учетом истории её развития, и для классификации сложных ситуаций (сценариев) по уровню безопасности вводится «шкала безопасности», включающая пять классификационных категорий **I, II, ..., V**:

- категория **I** – безопасные ситуации;
- категория **II** – условно-безопасные ситуации;
- категория **III** – потенциально опасные ситуации;
- категория **IV** – опасные или запрещенные ситуации;
- категория **V** – катастрофические ситуации типа «цепная реакция».

Определения вышеперечисленных категорий и критерии классификации ситуаций на основе анализа преобладающей окраски и структуры их интегральных спектров даются в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что каждой категории безопасности поставлен в соответствие уникальный код i и цвет ξ^i ,

$\xi^i \in \{\xi^I, \xi^{II}, \dots, \xi^V\}$, где $\xi^I \equiv \xi_G, \xi^{II-a} \equiv \xi_Y, \xi^{IV} \equiv \xi_R, \xi^V \equiv \xi_B$ – см. определение базовой палитры (9); $\xi^{II-b} \equiv \xi_S, \xi^{III} \equiv \xi_O$ – цвета «салатовый» (■) и «оранжевый» (■), добавленные для обозначения промежуточных градаций безопасности.

Таблица 1. Категории безопасности полёта и критерии классификации полётных ситуаций.

Категория безопасности			Критерий классификации ситуаций (сценариев)
Цвет	Код	Характеристика ситуаций	
■	I	Безопасные	Допускается приближение состояния системы к ограничениям без их нарушения, то есть кратковременное пребывание состояния системы в «желтой» зоне, с последующим покиданием её к концу ситуации
■	II-a	Условно-безопасные, а	Допускается временное пребывание состояния системы у ограничений, то есть в «желтой» зоне
■	II-b	Условно-безопасные, b	Допускается длительное пребывание состояния системы у ограничений, то есть в «желтой» зоне
■	III	Потенциально опасные	Наблюдается незначительное нарушение ограничений, то есть кратковременное нахождение состояния системы в «красной» зоне, с последующим покиданием её к концу ситуации
■	IV	Опасные (запрещенные)	Наблюдается значительное нарушение ограничений, то есть временное или длительное нахождение состояния системы в «красной» зоне, либо состояние системы остается в ней до конца ситуации
■	V	Катастрофические («цепная реакция»)	Хотя бы одно ограничение нарушено с катастрофическими последствиями, то есть состояние системы, по крайней мере, один раз попадает в «чёрную» зону

Существенно, что при отнесении ситуации к той или иной категории безопасности учитываются физико-логические свойства полёта, суммарная длительность и расположение на оси полётного времени участков преобладающих цветов $\xi_i, \xi_j \in \{\xi_G, \xi_Y, \xi_R, \xi_B\}$, в интегральном спектре Σ .

2.3. Макроструктурная модель

В условиях реальной эксплуатации ЛА полётные ситуации могут существенно отличаться от идеальных, базовых сценариев и между собой. Систематические знания о возможных вариантах развития базовой ситуации, которые представляют собой результат воздействия на ЛА различных комбинаций эксплуатационных факторов, образуют «макроструктуру» полёта (см. рис. 1). «Макроструктура» полёта может рассматриваться как обобщенная формальная модель базы ситуационно-тактических знаний о полёте для использования в реальном масштабе времени. В данном параграфе дается введение в основные понятия и отношения макроструктурной модели.

2.3.1. Эксплуатационный фактор. Эксплуатационный фактор – это физический эффект спонтанного, трудноизмеримого влияния реальной эксплуатационной среды на динамику или управление полётом ЛА. Эксплуатационные факторы могут варьироваться в полёте весьма значительно и независимо от воли оператора, оказывая прямое воздействие на состояние безопасности полёта.

Эксплуатационный фактор Φ формализуется в модели как событие или процесс, либо как параметр события или процесса. Влияние эксплуатационных

факторов моделируется путем введения новых событий или процессов в базовый сценарий, изъятия отдельных событий или процессов из сценария, либо как изменение описания существующих событий или процессов. Каждый фактор Φ описывается определенной переменной $x_i, x_i \in X$. Эксплуатационные факторы используются для получения в эксперименте на модели множества нештатных (многофакторных) ситуаций – вариаций базового сценария (6) – в форме ситуационного дерева. Каждая производная ситуация («полёт»), входящая в дерево, соответствует одной комбинации факторов Φ_j (переменных x_i) и их значений, которые вводятся в сценарий по специальному правилу.

Таким образом, благодаря использованию языка «события-процессы» унифицирован способ задания разнородных эксплуатационных условий в модели. Примеры формализации эксплуатационных факторов можно найти в [1-4, 6].

2.3.2. Эксплуатационная (рабочая) гипотеза. Эксплуатационная (рабочая) гипотеза Γ – это формальное правило для введения новой комбинации эксплуатационных факторов в базовый сценарий:

$$(19) \quad \Gamma = \prod_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^m \Phi_k^i \right],$$

где Φ_k^i – k -тый зависимый фактор, добавленный к базовому сценарию на i -том независимом уровне ветвления ситуационного дерева, $i = 1, \dots, n$, $k = 1, \dots, m$; Π – символ Декартова произведения; Σ – символ зависимой комбинации значений Φ_k^i фактора Φ_k^i на i -том уровне. Таким образом, правило Γ может рассматриваться как «генотип» ситуационного дерева, определяющий его форму, плотность кроны, порядок (n), размер (объем), другие свойства.

2.3.3. Ситуационное дерево. Глубинную причину авиационных катастроф и инцидентов можно определить как не устраненное в полёте несоответствие между фактическим (текущим) и базовым (предписанным) сценариями ситуаций. При этом оператору могут быть незнакомы оба сценария, либо реальная ситуация может сильно отличаться от ожидаемого базового сценария. Поэтому желательно заблаговременно изучить как можно большее количество базовых ситуаций, а также их вариаций («окрестностей»), образующихся в результате суперпозиции нескольких эксплуатационных факторов. В качестве генератора многофакторных ситуаций используется макроструктурная модель.

Результаты макроструктурного моделирования удобно представить в виде ситуационного дерева [2, 3] – см. рис. 1. Ситуационное дерево T – это объединение родственных ситуаций (траекторий, «полётов» F_{i_k}), полученных как вариации базового сценария S под влиянием заданного комплекса эксплуатационных факторов:

$$(20) \quad T = \Omega(F) \equiv \{F_{i_1}, \dots, F_{i_k}, \dots, F_{i_{N(T)}}\},$$

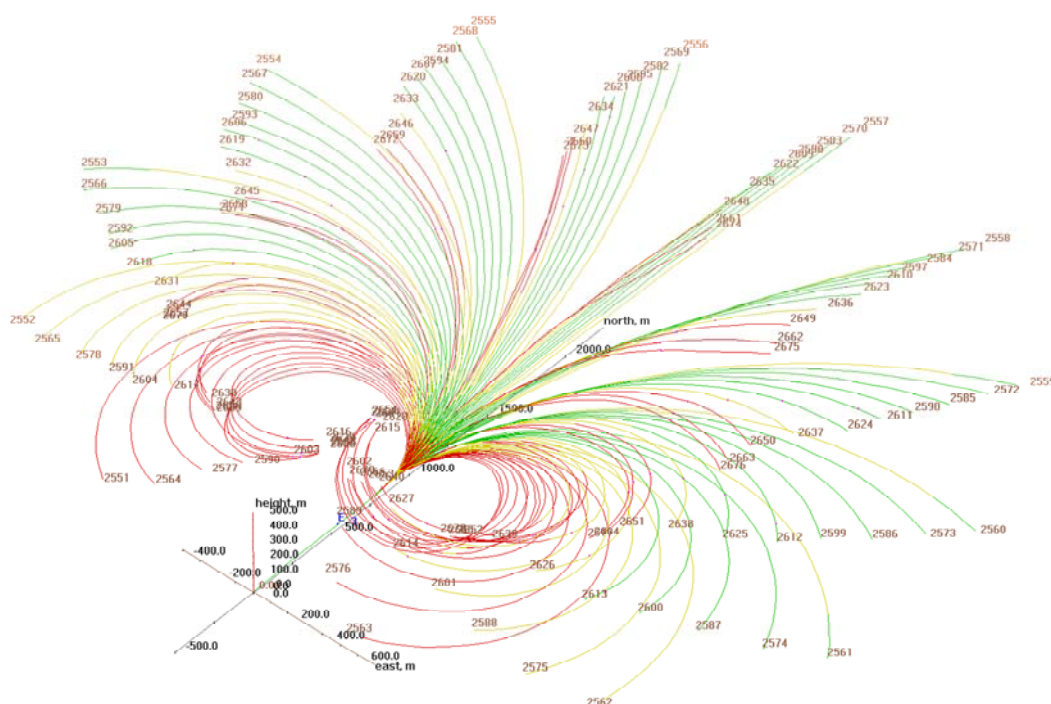
где $N(T)$ – количество «полётов» в T , $N(T) = i_{N(T)} - i_1 + 1$, i_k – код «полёта», $k = 1, \dots, N(T)$.

Развитие каждой ситуации-ветви B_k («полёта» F_{i_k}) в дереве T определяется набором и значениями (силой) эксплуатационных факторов Φ_j , действующих в ситуации, базовым сценарием S и динамикой системы, $k = 1, \dots, N(T)$. Таки образом, ситуационное дерево можно представить как композицию сцена-

рия базовой ситуации S и рабочей гипотезы Γ в вычислительном эксперименте, то есть

$$(21) \quad T = S \cdot \Gamma.$$

Ситуационное дерево изображают в проекции на плоскость или в пространстве. Координатные оси выбирают, исходя из удобства анализа. Пример ситуационного дерева $S_1 \cdot \Gamma_{11}$: «Взлёт нормальный и начальный набор высоты. Вариации или ошибки выбора целевого угла наклона траектории θ_{G1} и целевого угла крена γ_G » показан на рис. 5 в нормальной земной системе координат.



Пояснения: $S_1 \cdot \Gamma_{11} = \{F_{2551}, \dots, F_{2680}\}$ – ситуационное дерево «полетов», полученное в результате композиции сценария S_1 и гипотезы Γ_{11} ; S_1 – базовый сценарий (взлет нормальный); Γ_{11} – испытанная эксплуатационная гипотеза, $\Gamma_{11} = \Phi_7 \times \Phi_{11}$; Φ – эксплуатационный фактор; $\Phi_7 \equiv \theta_{G1}$ – целевой угол наклона траектории, $\Omega(\Phi_7) = \{2^\circ; 4^\circ; \dots; 20^\circ\}$; $\Phi_{11} \equiv \gamma_G$ – целевой угол крена, $\Omega(\Phi_{11}) = \{-45^\circ; -37,5^\circ; \dots; +45^\circ\}$; F_k – «полет»; B_j – ветвь дерева, $B_j \equiv F_k, j = 1, \dots, N(S_1 \cdot \Gamma_{11}), k = 2551, \dots, 2680, N(S_1 \cdot \Gamma_{11})$ – количество ветвей в $S_1 \cdot \Gamma_{11}$, $N(S_1 \cdot \Gamma_{11}) = 130$; $\Delta t(B_j)$ – длина ветви по времени: $(\forall j) (j = 1, \dots, N(S_1 \cdot \Gamma_{11})) (\Delta t(B_j) = 60 \text{ с})$; (north, east, height) $\equiv (X_g, Z_g, H)$ – оси нормальной земной системы координат, в которой построено дерево $S_1 \cdot \Gamma_{11}$; ■ ■ ■ – цвета безопасности.

Рис. 5. Ситуационное дерево $S_1 \cdot \Gamma_{11}$: «Взлёт нормальный и начальный набор высоты. Вариации или ошибки выбора целевого угла наклона траектории и целевого угла крена».

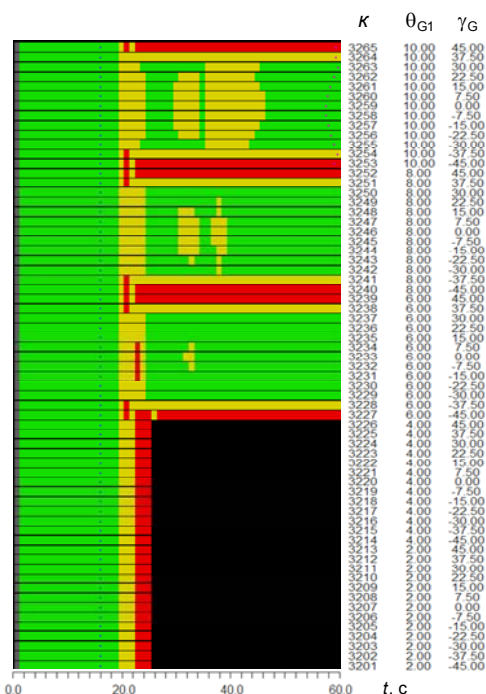
Дерево $S_1 \cdot \Gamma_{11}$ построено с помощью ПМК VATES. Окраска ветвей соответствует интегральным спектрам безопасности составляющих его «полётов» F_k (2); коды k указаны на концах ветвей. Видно, что понятие ситуационного дерева позволяет интегрально представить семейство родственных ситуаций, систематически отразить влияние заданных факторов на положение траекторий и уровень безопасности полёта. Для анализа физики и логики полёта дополнительно могут использоваться события из $\Omega^R(E)$ в привязке к ветвям B_k .

2.3.4. Семейство интегральных спектров безопасности. Нередко возникает необходимость в сравнительном анализе свойств безопасности множества «родственных» ситуаций. Для этой цели используется графоаналитическая форма, называемая семейством интегральных спектров безопасности:

$$(22) \quad \{ \Sigma(F_{i_1}), \dots, \Sigma(F_{i_k}), \dots, \Sigma(F_{i_{N(T)}}) \}.$$

Форма (22) – это набор интегральных спектров безопасности $\Sigma(F_{i_k})$, построенных один над другим на единой шкале времени $[t_*, t^*]$ согласно (18) и упорядоченных по возрастанию или убыванию значений ключевых эксплуатационных факторов в ситуациях F_{i_k} . Форма (22) дает интегральную картину качественного изменения безопасности полёта для множества ситуаций в зависимости от значений эксплуатационных факторов. Пример семейства интегральных спектров безопасности для ситуационного дерева представлен на рис. 6.

(а) интегральные спектры безопасности для подмножества «полетов» $\{F_{3201}, \dots, F_{3265}\}$



(б) интегральные спектры безопасности для подмножества «полетов» $\{F_{3266}, \dots, F_{3330}\}$



Пояснения: $S_4 \cdot \Gamma_{13} = \{F_{3201}, \dots, F_{3330}\}$ – ситуационное дерево «полетов»; S_4 – базовый сценарий «Взлет в условиях сдвига ветра»; $\Gamma_{13} = \Phi_9 \times \Phi_7 \times \Phi_{11}$ – рабочая гипотеза, $\Phi_9 \equiv k_W$, k_W – сдвиг ветра, $k_W = 1,5$ («очень сильный»); $\Phi_7 \equiv \theta_{G1}$, θ_{G1} – заданный угол наклона траектории [град]; $\Phi_{11} \equiv \gamma_G$, γ_G – заданный угол крена [град]; k – код «полета», $k \in \{3201, \dots, 3330\}$; ■■■ – цвета безопасности; • – событие E_3 : «скорость V_R достигнута», V_R – скорость отрыва носовой стойки от ВПП; • – событие E_{108} : « $H=400$ м», H – высота полета; t – время.

Рис. 6. Семейство интегральных спектров безопасности для ситуаций из дерева $S_4 \cdot \Gamma_{13}$: «Взлёт нормальный, «очень сильный» сдвиг ветра. Вариации или ошибки выбора целевого угла наклона траектории начального набора высоты и целевого угла крена».

Из данных рис. 6 видно, например, как изменяется картина безопасности полёта при увеличении значений целевых углов наклона траектории и крена в условиях «очень сильного» сдвига ветра. Также видны предельно допустимые значения эксплуатационных факторов, испытанных в композиции $S_4 \cdot \Gamma_{13}$.

2.3.5. Структурные элементы ситуационного дерева и уровень сложность ситуации. Определим структурные элементы ситуационного дерева (см. рис. 1): «ствол», «ветвь», «почка», «узел», «лист», «корень», «поддерево». «Ствол» (ветвь нулевого уровня) B_0 есть базовая ситуация. Производная ветвь (ситуация, траектория, «полёт») n -го уровня B_n , $n=1, 2, \dots, N$, – это вариация ситуации предыдущего уровня (B_{n-1}), полученная при введении в сценарий B_{n-1} нового набора факторов, где N – максимальное количество уровней ветвления или порядок ситуационного дерева.

Ветвление дерева начинается в особых состояниях-событиях типа «почка» $\bullet$ и заканчивается в состояниях типа «лист» $\diamond$. Для регистрации направления эволюции системы и контроля ограничений в полёте на каждой ветви задают ряд промежуточных состояний-«узлов» $\circ$. «Корень» дерева T (поддерева T_n), Δ , есть первое состояние типа «почка» на родительской ветви B_{-1} (ветви B_{n-1}).

Уровень сложности полётной ситуации зависит от набора, количества и силы действующих в ней эксплуатационных факторов. Чем выше уровень ветви, n , тем, как правило, сложнее ситуация.

Объединение всех поддеревьев из T , начиная с уровня $(N-r)$, образует «крону» ситуационного дерева, где r – толщина кроны. При некотором достаточно высоком уровне сложности ситуации состояние системы может выйти за ограничения $C(x_i)$ (см. рис. 1), что чревато инцидентом или катастрофой. И наоборот: введение определенных корректирующих факторов Φ_j в сложный сценарий может способствовать восстановлению безопасного режима движения.

2.3.6. Распределение шансов безопасности. Любое ситуационное дерево можно разбить на шесть непересекающихся кластеров ситуаций («полётов») равной безопасности:

$$(23) \quad \{K^I, K^{II-a}, K^{II-b}, K^{III}, K^{IV}, K^V\}.$$

При этом декомпозиция дерева может осуществляться автоматически. Имея формальные определения кластеров (23), можно получить распределение шансов безопасности для ситуационного дерева,

$$(24) \quad \{\chi^I, \chi^{II-a}, \chi^{II-b}, \chi^{III}, \chi^{IV}, \chi^V\}.$$

Для этого используется следующий алгоритм:

$$(25) \quad (\forall j)(j=I, II, \dots, V)(n^j=0)(\forall F_k)(F_k \in T, T \equiv \{F_1, \dots, F_{N(T)}\} \wedge N(T) \neq 0)(F_k \in K^j \Rightarrow n^j = n^j + 1) \wedge \chi^j = \frac{n^j}{N(T)} \cdot 100) \wedge \sum_{j=1}^V \chi^j = 100\%,$$

где n^j – счетчик ситуаций в кластере K^j .

Пример распределения шансов безопасности, полученного для ситуаций из дерева $S_4 \cdot \Gamma_{13}$: «Взлёт нормальный в условиях «очень сильного» сдвига ветра. Вариации (ошибки) выбора целевых углов наклона траектории и крена при наборе высоты», показан на рис. 7.

Распределение шансов безопасности в виде (24) позволяет визуально оценить шансы безопасного продолжения полёта на отрезке времени существования ситуации $[t_*; t^*]$ в условиях заданной эксплуатационной гипотезы.

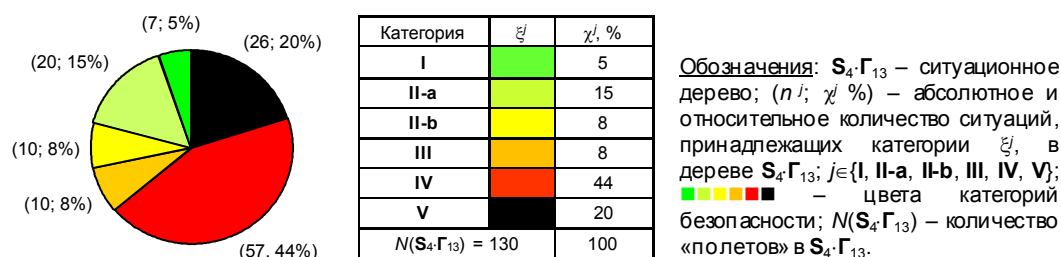
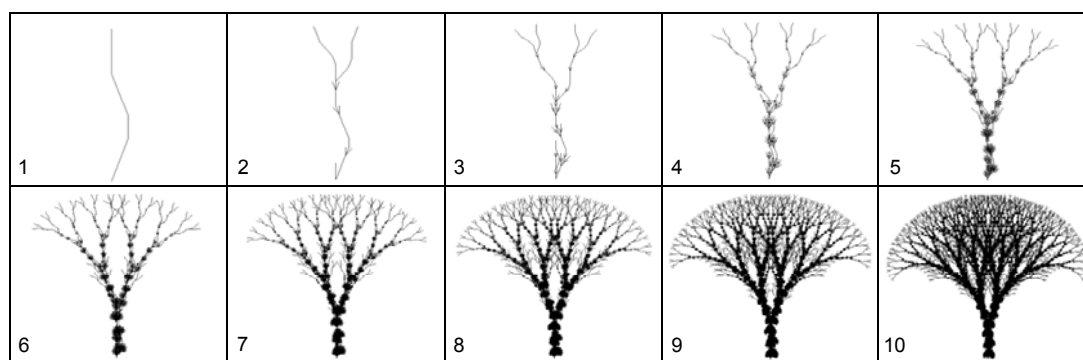


Рис. 7. Распределение шансов безопасности для ситуаций из дерева $S_4 \cdot \Gamma_{13}$:

«Взлёт нормальный в условиях «очень сильного» сдвига ветра. Вариации или ошибки выбора целевых углов наклона траектории и крена при наборе высоты».

2.3.7. Внутреннее «ситуационное дерево» оператора-оператора. Можно предположить, что ситуационно-тактический опыт человека-оператора «выращивается» и хранится в долговременной памяти в виде образов, близких к древовидной логической структуре знаний. Так же, как и фруктовое дерево, внутреннее «дерево знаний» человека-оператора требует ухода. Этот процесс включает формирование кроны, в том числе прививку новых ветвей, восстановление утраченных ветвей, обрезку бесполезных ветвей и др. Цель – для заданного типа ЛА и этапа полёта получить компетентную, компактную и доступную в полёте систему знаний, соответствующую ожидаемым условиям эксплуатации.

Идеальной моделью, иллюстрирующей процесс накопления ситуационно-тактического опыта в долговременной памяти человека-оператора, является фрактал. Динамика роста дерева-фрактала, характеризующая многошаговый процесс формирования условного ситуационного дерева, показана на рис. 8.



Пояснения: $K = 1, 2, \dots, 10$ – шаги процесса обучения: $k = 1$ – опыт новичка, $k = 10$ – опыт эксперта.

Рис. 8. Рост дерева-фрактала как модель идеального процесса формирования ситуационно-тактического опыта человека-оператора динамической системы в долговременной памяти.

Из рис. 8 видно, что характерные уровни опыта человека-оператора и их эволюция во времени иллюстрируются десятью шагами условного процесса становления опыта, $k = 1, \dots, 10$: $k \in \{1, 2, 3\}$ – опыт курсанта; $k \in \{8, 9, 10\}$ – опыт профессионала; $k \in \{4, \dots, 7\}$ – промежуточные уровни (незрелый опыт).

На рис. 9 показано естественное дерево, которое может служить моделью структурно-логических дефектов системы ситуационно-тактических знаний лётчика. К ним относятся: утраченные знания, забытые или затененные знания, бессистемные знания, фрагментарные знания [1, 2] и др.

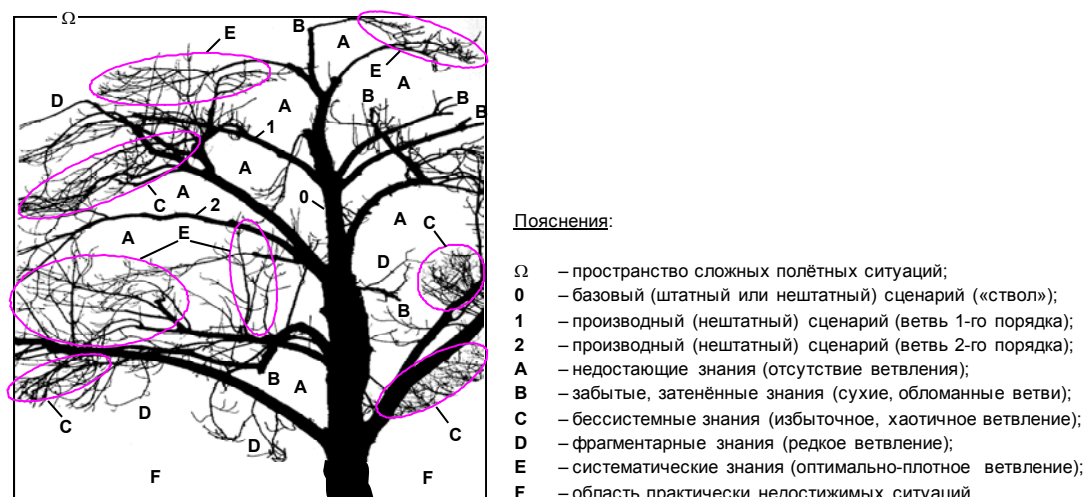


Рис. 9. Иллюстрация структурно-логических дефектов в системе ситуационно-тактического опыта лётчика при недостатке подготовки.

2.3.8. Компетентность и специализация ситуационного дерева. Так же, как и опыт лётчика, объем знаний, представленных в искусственном ситуационном дереве, можно измерить. Пусть ситуационное дерево T есть композиция сценария S и эксплуатационной гипотезы Γ . Тогда суммарный «виртуальный налет» $\mathfrak{Z}$ (в часах), аккумулированный в T , вычисляется по формуле [1, 4]:

$$(26) \quad \mathfrak{Z}|T = \sum_{i=1}^{N(T)} \Delta t(B_i) \cdot 3600^{-1},$$

где T – ситуационное дерево, $T = S \cdot \Gamma$, $N(T)$ – количество ветвей-«полётов» B_i в T , $\Delta t(B_i)$ – длина ветви B_i в секундах полётного времени, $i = 1, \dots, N(T)$. Например, для дерева $T, T = S_1 \cdot \Gamma_{11}$, состоящего из 130 ситуаций, продолжительностью по 60 секунд каждая, суммарный «виртуальный налет» равен: $\mathfrak{Z}|T \equiv N(T) \cdot \Delta t \approx 2,2$ ч.

Аналогичным образом может быть вычислен суммарный «виртуальный налет», накопленный в «лесу» ситуационных деревьев $\Omega(T)$ – множестве композиций базовых сценариев S_l и эксплуатационных гипотез Γ_k :

$$(27) \quad \mathfrak{Z}|\Omega(T) = \sum \mathfrak{Z}|S_l \cdot \Gamma_k, l \in \{1, \dots, N(S)\}, k \in \{1, \dots, N(\Gamma)\},$$

где $N(S)$ и $N(\Gamma)$ – количество базовых сценариев и эксплуатационных гипотез,

$$(28) \quad N(T) \leq N(S) \cdot N(\Gamma).$$

Искусственные ситуационные деревья могут использоваться в качестве основы для построения баз знаний бортовых систем безопасности различного назначения: помощь лётчику, восстановление безопасного режима, выполнение сложных маневров, предотвращение угона, автономный полёт и др. Специализация «опыта» дерева T определяется гипотезой Γ , этапом полёта (S), полётным заданием и типом ЛА. Ситуационные деревья с требуемыми характеристиками компетентности и специализации можно «выращивать» в вычислительном эксперименте с системной моделью. Эксплуатационные гипотезы, реализованные в бортовой базе знаний, должны учитывать ожидаемые условия эксплуатации, тактику применения ЛА, историю авиационных катастроф и инцидентов.

Сравнение показателей $\mathfrak{Z}$ и $\mathbf{\Gamma}$ двух операторов ЛА (например, лётчика и автомата) является объективной основой для обоснования автоматической передачи юридического права управления наиболее компетентному из них в предкритической ситуации, начиная с «точки возврата», если в результате прогноза развития ситуации (по дереву $\mathbf{T}$) распознана угроза «цепной реакции» катастрофы. Такая дилемма может возникнуть, например, при создании искусственно-интеллектуальных систем безопасности полёта ЛА для блокирования преднамеренных катастроф, подобных событиям 11 сентября 2001 года в США.

2.3.9. Окно безопасности. Пусть имеется дерево «полётов» $\Omega(F)$,

$$(29) \quad \Omega(F) = \{F_{(1),(1)}, \dots, F_{(i),(j)}, \dots, F_{(m),(n)}\},$$

со следующими парами значений двух произвольных ключевых эксплуатационных факторов Φ_a и Φ_b :

$$(30) \quad \{(\Phi_{a(1)}, \Phi_{b(1)}), \dots, (\Phi_{a(i)}, \Phi_{b(j)}), \dots, (\Phi_{a(m)}, \Phi_{b(n)})\},$$

где $\Phi_{a(1)} < \Phi_{a(2)} < \dots < \Phi_{a(m)}$ – отношение вертикального упорядочивания (снизу вверх) для значений первого фактора Φ_a , а $\Phi_{b(1)} < \Phi_{b(2)} < \dots < \Phi_{b(n)}$ – отношение горизонтального упорядочивания (слева направо) для значений второго фактора Φ_b . Тогда окно безопасности полёта можно формально определить как матрицу размерности $m \times n$,

$$(31) \quad W(\Phi_a, \Phi_b),$$

с координатами Φ_a и Φ_b , где w_{ij} – ячейка, расположенная на пересечении строки i и столбца j ,

$$(32) \quad w_{ij} = [(\Phi_{a(i)}, \Phi_{b(j)}), \xi_{ij}^k],$$

где $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, k \in \{\mathbf{I}, \mathbf{II}, \dots, \mathbf{V}\}$.

Ячейка w_{ij} содержит следующую информацию:

- $(\Phi_{a(i)}, \Phi_{b(j)})$ – пара значений факторов (Φ_a, Φ_b) , где $(\forall i)(i = 1, \dots, m) (\Phi_{a(i)} = \text{const})$ и $(\forall j)(j = 1, \dots, n) (\Phi_{b(j)} = \text{const})$;
- ξ_{ij}^k – цвет k -того кластера безопасности, к которому принадлежит «полёт» $F_{(i),(j)}$, $k \in \{\mathbf{I}, \mathbf{II}, \dots, \mathbf{V}\}$, $\xi_{ij}^k \in \{\xi^{\mathbf{I}}, \xi^{\mathbf{II}}, \dots, \xi^{\mathbf{V}}\}$.

В ПМК VATES реализован алгоритм, позволяющий автоматически отображать «полёты» из множества $\Omega(F)$ в виде окна безопасности $W(\Phi_a, \Phi_b)$ в координатах заданных факторов Φ , $\Omega(F) \equiv \mathbf{T} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{\Gamma}$.

На рис. 10 показано окно безопасности, построенное для ситуаций композиции $\mathbf{S}_4 \cdot \mathbf{\Gamma}_{13}$: «Взлёт в условиях «очень сильного» сдвига ветра. Вариации или ошибки выбора целевых углов наклона траектории и крена при наборе высоты», $\theta_{G1} \equiv \Phi_7$, $\gamma_G \equiv \Phi_{11}$, $\Omega(\theta_{G1}) = \{2^\circ, 4^\circ, \dots, 20^\circ\}$, $\Omega(\gamma_G) = \{-45^\circ, -37,5^\circ, \dots, 45^\circ\}$. Из данных рис. 10 видно, в частности, что значения факторов Φ_7 и Φ_{11} в ячейках w_{ij} , $i = 1, \dots, 10, j = 1, \dots, 13$, комбинируются по правилу Декартова произведения подмножеств $\Omega(\theta_{G1})$ и $\Omega(\gamma_G)$, порождая 130 производных ситуаций, то есть

$$(33) \quad \mathbf{\Gamma} = \Phi_7 \times \Phi_{11}.$$

Из рис. 10 также следует, что окно безопасности, построенное для гипотезы $\mathbf{\Gamma}_{13}$, имеет потенциально опасную зону в нижней его части с координатами

$(\theta_{G1}, \gamma_G) \in (2^\circ \dots 6^\circ; -45^\circ \dots 45^\circ)$. Здесь возможен резкий необратимый переход состояний системы в катастрофическую область (I...IV $\rightarrow$ V), минуя промежуточные категории. Полёт в такой зоне требует от оператора повышенного внимания и аккуратного пилотирования.

Φ ₉ : «Сдвиг ветра» (K _W = 1,5 - «очень сильный»)		Φ ₁₁ : «Целевой угол крена», [град]												
		-45	-37,5	-30	-22,5	-15	-7,5	0	7,5	15	22,5	30	37,5	45
Φ ₇ : «Целевой угол наклона траектории начального набора высоты», [град]	20													
	18													
	16													
	14													
	12													
	10													
	8													
	6													
	4													
2														

Пояснения: ■■■■ – цвета категорий безопасности; $\Gamma_{13} = \Phi_9 \times \Phi_7 \times \Phi_{11}$ – эксплуатационная гипотеза, реализованная в дереве $S_4 \cdot \Gamma_{13}$; $\Phi_9 = k_W$ – сдвиг ветра, $k_W = 1,5$ («очень сильный»); Φ_7, Φ_{11} – координаты окна безопасности; $\Phi_7 \equiv \theta_{G1}$ – целевой угол наклона траектории; $\Phi_{11} \equiv \gamma_G$ – целевой угол крена.

Рис. 10. Окно безопасности полёта для ситуаций из дерева $S_4 \cdot \Gamma_{13}$: «Взлёт нормальный в условиях «очень сильного» сдвига ветра. Вариации или ошибки выбора целевых углов наклона траектории и крена при наборе высоты».

Таким образом, окно безопасности дает качественную системную картину возможных последствий реализации нестандартных сценариев управления при воздействии комплекса эксплуатационных факторов. Дефицит системных знаний об особенностях динамики и логики развития многофакторных ситуаций привёл, в частности, в 70-х годах XX века к серии катастроф с пассажирскими воздушными судами на этапах взлёта и посадки в условиях сдвига ветра.

2.3.10. «Топология» безопасности полёта. Пусть имеется дерево «полётов» $\Omega(F)$,

$$(34) \quad \Omega(F) = S \cdot \Gamma,$$

и ассоциированное с ним окно безопасности

$$(35) \quad W(\Phi_a, \Phi_b).$$

Тогда свойства безопасности множества ситуаций $\Omega(F)$ можно отобразить графически в окне $W(\Phi_a, \Phi_b)$ согласно определениям классификационных категорий $\{I, \dots, V\}$ из таблицы 1, $\Phi_a, \Phi_b \in \{\Phi_{l(1)}, \dots, \Phi_{l(N(\Phi))}\}$. Соответственно, в окне $W(\Phi_a, \Phi_b)$ можно выделить следующие характерные топологические объекты (рис. 11):

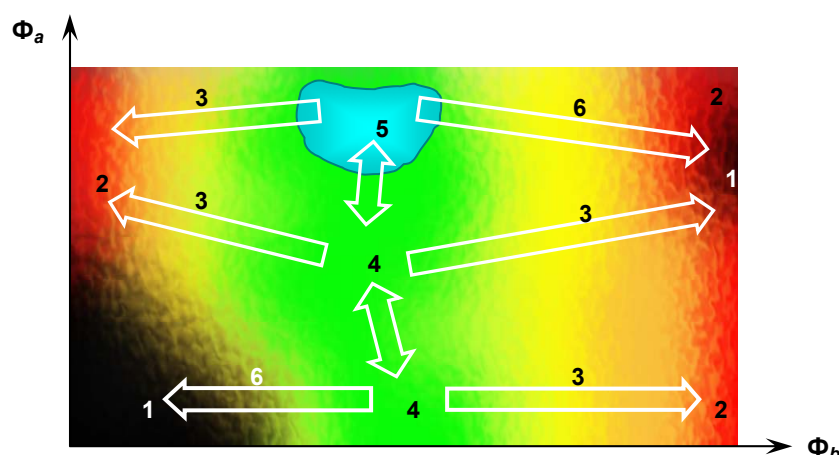
- «пропасть» 1 (состояние катастрофы, «чёрный» цвет χ^V);
- «холм» 2 (состояние опасности, «красный» цвет χ^{IV});
- «склон» 3 (плавный, обратимый переход состояний):

$$(36) \quad (\xi^I \vee \xi^{II-a}) \rightarrow (\xi^{II-b} \vee \xi^{III}) \rightarrow (\xi^{IV}) \text{ или } (\blacksquare \vee \blacksquare) \rightarrow (\blacksquare \vee \blacksquare) \rightarrow (\blacksquare);$$

- «долина» 4 (состояние нормальной безопасности, «зеленый» цвет χ^I);
- «озеро» 5 (состояние максимальной безопасности, оптимум, цвет ξ_T);

- «обрыв» 6 (резкий, необратимый переход состояния безопасности, или «цепная реакция»:

$$(37) \quad ((\xi^I \vee \xi^{II-a}) \rightarrow \xi^V) \vee (\xi^{II-b} \rightarrow \xi^V) \text{ или } ((\blacksquare \vee \blacksquare) \rightarrow \blacksquare) \vee (\blacksquare \rightarrow \blacksquare).$$



Обозначения: Φ_a , Φ_b – ключевые эксплуатационные факторы (координаты окна безопасности); характерные объекты «топологии» безопасности: 1 – «пропасть» (катастрофические состояния), 2 – «холм» (состояния с нарушениями ограничений), 3 – «склон» (опасные обратимые переходы), 4 – «долина» (состояния, соответствующие нормам безопасности), 5 – «озеро» (оптимальные состояния, соответствующие максимальной безопасности или эффективности), 6 – «обрыв» (опасные необратимые переходы, «цепная реакция» катастрофы); $\blacksquare$, $\blacksquare$, $\blacksquare$, $\blacksquare$, $\blacksquare$ – цвета категорий безопасности.

Рис. 11. К определению «топологии» безопасности полёта.

Качественная цветографическая картина взаимного положения и взаимозависимости вышеперечисленных объектов в окне $W(\Phi_a, \Phi_b)$ называется «топологией» безопасности многофакторной области полётных ситуаций с факторами влияния Φ_a, Φ_b .

2.3.11. Динамическое окно безопасности. Предположим, что ЛА оснащён «машиной наблюдения» – набором мультимодальных датчиков, позволяющих измерять значения ключевых факторов Φ_a, Φ_b и, возможно, третьего критического фактора, Φ_c , в реальном или квазиреальном масштабе времени. Тогда можно построить хронологическую последовательность окон безопасности:

$$(38) \quad W(\Phi_a, \Phi_b)|_{t_0}, W(\Phi_a, \Phi_b)|_{t_1}, W(\Phi_a, \Phi_b)|_{t_2}, \dots,$$

– для серии моментов времени измерений полётных данных $\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$. Такая последовательность,

$$(39) \quad W(\Phi_a, \Phi_b)|_{t_i} \wedge \Phi_c = \Phi_c(t_i), t_i = t_0, t_1, t_2, \dots,$$

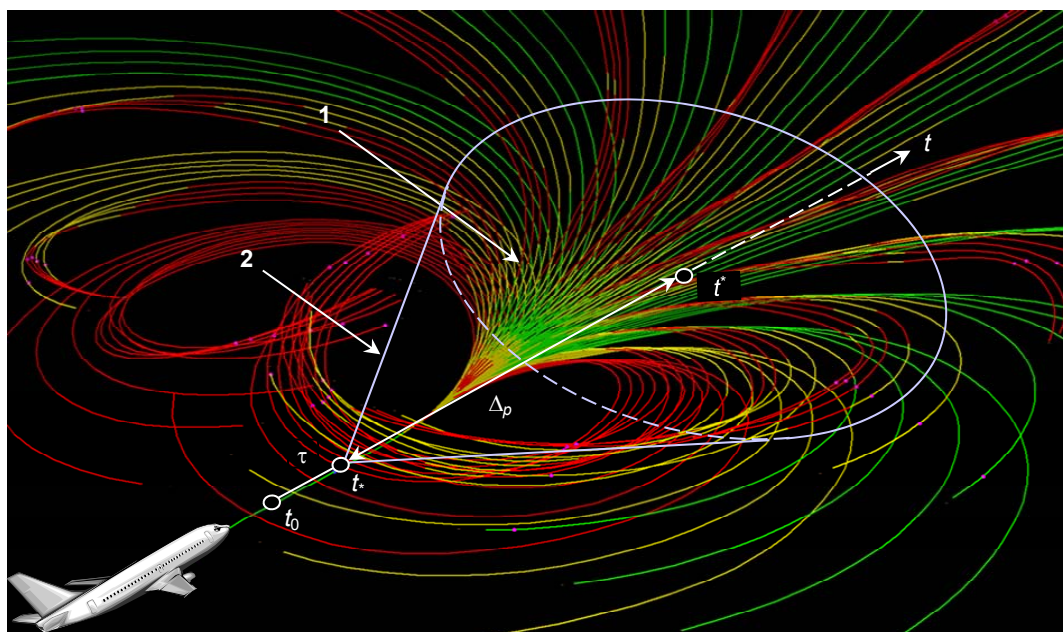
называется динамическим окном безопасности, или

$$(40) \quad W(\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c) = f(t).$$

Динамическое окно (40) позволяет наглядно отобразить влияние третьего критического фактора Φ_c на свойства безопасности полёта ЛА в условиях рабочей гипотезы $\Phi_a \times \Phi_b$. Виртуальная среда реального времени, в которой реализована последовательность $W(\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c) = f(t)$, представляет собой систему интеллектуального интерфейса «оператор – ЛА», которая может использоваться для активного управления состоянием безопасности полёта ЛА в многофакторных условиях, в частности, вблизи ограничений [7, 8].

2.3.12. «Точка возврата». Рассмотрим задачу прогнозирования безопасности полёта ЛА в реальном масштабе времени на основе бортовой базы знаний в форме ситуационных деревьев. Пусть заданы следующие параметры (рис. 12):

- Δ_p – глубина прогноза безопасности во времени;
- τ – запаздывание или задержка принятия решений по безопасности;
- $[t_*; t_* + \Delta_p]$ – интервал времени прогноза, $[t_*; t_* + \Delta_p] \subset [t_*; t^*]$;
- $\{\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c\}$ – тройка ключевых эксплуатационных факторов, подлежащих мониторингу, $\{\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c\} \subset \Omega(\Phi)$.



Пояснения: 1 – ситуационное дерево, используемое для краткосрочного прогноза безопасности полета; 2 – конус анализа многофакторной области возможных траекторий движения (поддерево прогноза); t_0 – текущее время, t – момент начала прогноза, t' – момент окончания прогноза, $\tau = (t - t_0)$ – запаздывание принятия решения, $\Delta_p = (t' - t)$ – глубина прогноза по времени; ■ ■ ■ – цвета безопасности.

Рис. 12. Принцип краткосрочного физико-логического прогноза безопасности полёта ЛА на основе ситуационных деревьев.

Тогда из ситуационного дерева $\mathbf{T}$, которое соответствует активной фазе полёта, можно выделить и обработать поддерево $\mathbf{T}'$, берущее свое начало в текущей ситуации, где t_* – точка начала прогноза, определенная по отношению к текущему моменту времени полёта t_0 , $\Delta_p \in [3; 15...20]$ с. Для всех ситуаций из $\mathbf{T}'$ можно вычислить вероятность $(\chi^{\text{IV}} + \chi^{\text{V}})$ события, при котором состояние системы попадает в зону $(\xi^{\text{IV}} \cup \xi^{\text{V}})$ внутри интервала прогноза $[t_*; t_* + \Delta_p]$.

Если справедливо неравенство

$$(41) \quad (\chi^{\text{IV}} + \chi^{\text{V}}) > \chi_{\max},$$

то это означает, что необратимое развитие текущей ситуации неизбежно, где $\chi_{\max}$ – порог принятия решения по восстановлению безопасного режима полёта.

Значение $\chi_{\max}$ определяет «точку возврата» – момент последнего шанса для восстановления безопасного режима полёта, $t_{\uparrow}$. В данной точке любое текущее

штатное управление (лётчика или автомата) прекращается и к ЛА применяется сценарий восстановления безопасного режима движения. Существенно, что в основе процесса прогнозирования безопасности полёта и принятия решения о выборе корректирующего сценария лежат системные знания о физике и логике многофакторных ситуаций, хранимые в $\mathbf{T}$ и отображаемые в виде (31).

2.3.13. Сценарий восстановления безопасного режима полёта. Если многофакторная ситуация развивается необратимо, т.е. $(\chi^{\text{IV}} + \chi^{\text{V}}) > \chi_{\max}$, то для возвращения ЛА к безопасному режиму движения необходимо в момент времени $t_{\uparrow}$ (в точке «последнего шанса для восстановления безопасного режима») начать реализацию сценария корректирующего управления $\mathbf{S}_{\uparrow}$.

В качестве сценария $\mathbf{S}_{\uparrow}$ выбирается сценарий самой безопасной ветви из $\mathbf{T}'$, которая продолжает текущую ситуацию. Цель применения корректирующего сценария $\mathbf{S}_{\uparrow}$ – «отодвинуть» ЛА от «пропасти» (от объекта 1 на рис. 11) и вывести его из зоны необратимых переходов типа «обрыв» в окне безопасности (31). Сценарий $\mathbf{S}_{\uparrow}$ может выполняться автоматически, посредством интеллектуальной системы безопасности, или вручную человеком-оператором.

2.4. Алгоритм обеспечения «встроенной» безопасности полёта ЛА в многофакторных условиях

2.4.1. Исходные данные. Исходные данные для алгоритма обеспечения «встроенной» безопасности полёта представлены следующим набором:

$$(42) \quad \{\Omega(\mathbf{T}), \Omega(\Phi), \Omega(\Gamma), \Omega^M(\Phi), \{\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c\}, \\ \Omega(C), \mathbf{x}', t_0, \tau, \Delta, \Delta_p, \mathbf{T}, \mathbf{T}', \chi_{\max}, \dots\},$$

где:

- $\Omega(\mathbf{T})$ – «лес» ситуационных деревьев, соответствующий текущей фазе (участку, этапу) полёта;
- $\Omega(\Phi)$ – множество эксплуатационных факторов, испытанных в $\Omega(\mathbf{T})$;
- $\Omega(\Gamma)$ – множество эксплуатационных гипотез, реализованных в $\Omega(\mathbf{T})$;
- $\Omega^M(\Phi)$ – подмножество эксплуатационных факторов, выбранных для мониторинга состояния системы и прогнозирования безопасности полёта на борту в реальном времени, $\Omega^M(\Phi) = f(t), \Omega^M(\Phi) \subset \Omega(\Phi)$;
- $\{\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c\}$ – три ключевых фактора, выбранных для мониторинга и отображения текущей ситуации в окне безопасности на участке времени прогноза $[t_*; t_* + \Delta_p]$, $\{\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c\} \subset \Omega^M(\Phi), \Phi_a, \Phi_b, \Phi_c = f(t)$;
- $\Omega(C)$ – множество контролируемых нечётких ограничений;
- $\mathbf{x}'$ – подмножество контролируемых системных переменных, $\mathbf{x}' \subset \mathbf{x}$;
- t_0 – текущее полётное время;
- τ – запаздывание или задержка принятия решения;
- Δ – шаг мониторинга текущей ситуации;
- Δ_p – глубина прогноза ситуации во времени;
- $\mathbf{T}$ – текущее ситуационное дерево;
- $\mathbf{T}'$ – поддереву ситуационного прогноза полёта, $\mathbf{T}' \subset \mathbf{T}$;
- $\chi_{\max}$ – порог принятия решения;

- ... – другие параметры настройки алгоритма.

На основе данных из набора (42) определяются параметры настройки алгоритма принятия решений, в частности: t_* – момент времени начала прогноза, $t_* = t_0 + \tau$, и t^* – момент времени окончания прогноза, $t^* = t_* + \Delta_p$.

Набор параметров

$$(43) \quad \{\Omega(\Phi), \Omega(\Gamma), \Omega(C), x', \tau, \Delta, \Delta_p, \chi_{\max}, \dots\}$$

также может использоваться для настройки тактики управления безопасностью полёта с учетом сильных и слабых сторон деятельности конкретного лётчика (характеристик конкретной модели штатного автомата управления), а также с учетом лётно-технических характеристик и ограничений заданного типа ЛА.

2.4.2. Краткое описание алгоритма. Алгоритм обеспечения «встроенной» безопасности полёта ЛА включает типовую последовательность действий по анализу текущей ситуации и принятию решений. Эта последовательность выполняется на каждом шаге многошагового процесса и в самом общем случае включает следующие действия [4, 7]:

- 1) контроль эволюции состояния системы относительно ограничений;
- 2) краткосрочное прогнозирование траекторий ЛА с помощью бортовой базы знаний – «леса» ситуационных деревьев, реализующих семейство альтернативных сценариев («родственных» ситуаций типа «что ..., если ...?») и учитывающих вариации заданных комплексов эксплуатационных факторов;
- 3) построение и анализ состояния динамических окон безопасности, получаемых на основе интегральных спектров безопасности полётных ситуаций из ситуационного дерева или набора ситуационных деревьев, используемых для краткосрочного прогноза полёта;
- 4) оценка характера изменения структуры шансов безопасности (шансов безопасного, условно-безопасного, потенциально опасного, опасного и катастрофического развития ситуации);
- 5) распознавание «точки возврата» – особого состояния системы, определяющего последнюю возможность для восстановления безопасного режима движения ЛА в ожидаемых сложных условиях;
- 6) автономное или полуавтономное принятие решения на основе «императива самосохранения» – выбор новой тактической цели и сценария управления для увода ЛА от опасных ограничений (топологических объектов типа «обрыв»);
- 7) реализация новой тактики управления, реализующей «императив самосохранения», до момента восстановления безопасного режима движения.

3. Программно-моделирующий комплекс анализа и оценки безопасности полёта VATES

3.1. Назначение, область и цели применения

3.1.1. Назначение. Программно-моделирующий комплекс VATES предназначен для решения задач имитации, отображения, анализа и оценки свойств безопасности полёта ЛА в потенциально опасных сложных (многофакторных, аномальных, граничных, экстремальных) ситуациях методами математического моделирования и вычислительного эксперимента [5, 6].

3.1.2. Область применения. Область применения ПМК VATES – научно-методическое обеспечение сопровождение всех этапов жизненного цикла ЛА – от эскизного проектирования до расследования авиационных происшествий.

3.1.3. Цель применения. Цель применения комплекса – значительно увеличить (вширь и вглубь) объем и повысить качество априорных знаний об условиях зарождения и физико-логическом механизме развития многофакторных ситуаций, в том числе катастрофических сценариев, методах их профилактики, безопасного избежания или благополучного разрешения.

3.2. Состав, основные функции, особенности эксперимента и ограничения модели

3.2.1. Состав ситуационной модели. В ПМК VATES [5, 6] реализована обобщенная ситуационная модель поведения системы «оператор (лётчик, автомат) – ЛА – эксплуатационная среда». Основные компоненты модели:

- нелинейная математическая модель аэродинамики и динамики полёта ЛА;
- модель тактики управления оператора;
- модели воздействий эксплуатационной среды;
- модель полётной ситуации;
- средства планирования сценария ситуации;
- средства планирования эксплуатационной гипотезы;
- средства планирования ситуационного дерева;
- средства отображения результатов микро- и макроструктурного моделирования полёта (графоаналитические формы);
- средства анализа и оценки результатов моделирования по критериям безопасности.

3.2.2. Функции. Основные функции программы:

- настройка ситуационной модели на задачу исследования (микроструктурный анализ, макроструктурный анализ) и «параметрическое определение» ЛА;
- моделирование аэродинамики и динамики полёта ЛА;
- моделирование сценария полётной ситуации, тактики управления оператора;
- моделирование влияния эксплуатационных факторов и их комплексов;
- накопление, обработка и хранение базы данных эксперимента;
- отображение результатов вычислительного эксперимента с помощью семейства обобщенных графоаналитических форм (см. п. 3.3);
- анализ, классификация и оценка «полётов» по критериям безопасности.

3.2.3. Особенности организации эксперимента. Программа обеспечивает проведение вычислительного эксперимента – «виртуальные лётные испытания» ЛА в потенциально опасных многофакторных ситуациях с помощью обобщённой системной модели. Эксперимент проводится на ПЭВМ методом игрового ситуационного моделирования «что ..., если ...?», в ускоренном масштабе времени (1:20 ... 1:200), без участия лётчика-исследователя и применения специального лабораторного оборудования.

На выходе пользователь получает представительное множество реализаций многофакторных сценариев (в виде одиночных ситуаций или ситуационного дерева) и модельную статистику «виртуальных» катастроф и инцидентов для заданных многофакторных условий. Таким образом, ситуационная модель выступает в качестве генератора «виртуального налета» ЛА или проекта в потенциально опасных многофакторных условиях эксплуатации, которые недоступны для воспроизведения и анализа другими методами.

3.2.4. Ограничения. Надёжность прогноза безопасности полёта зависит от уровня достоверности и полноты описания «параметрического определения» ЛА – базы данных аэродинамических и других исходных характеристик ЛА.

3.3. Выходные графоаналитические формы

На выходе ПМК VATES получают семейство графоаналитических форм, предназначенных для отображения знаний высокого уровня обобщения о свойствах безопасности полёта ЛА в многофакторных ситуациях [5, 6].

3.3.1. Графоаналитические формы микроструктурной модели. К ним относятся: «граф сценария ситуации», «палитра безопасности» – «нечёткие ограничения полёта», «изменение параметров полёта во времени», «хронология событий полёта», «хронология развития сценария ситуации», «траектория движения ЛА в земной системе координат», «функциональная зависимость параметров полёта», «частные спектры безопасности», «интегральный спектр безопасности», «диаграмма изменения степени сложности ситуации», «хронология нарушения и восстановления нечётких ограничений», «лента траектория – крен», «лента траектория – крен» – «частный спектр безопасности», «лента траектория – крен» – «интегральный спектр безопасности», «хронология событий полёта» – «изменение параметров полёта во времени», «хронология событий полёта» – «траектория движения ЛА», «хронология событий полёта» – «интегральный спектр безопасности», «хронология событий полёта» – «лента траектория – крен», «кинограмма полёта».

3.3.2. Графоаналитические формы макроструктурной модели. К ним относятся: «ситуационное дерево полёта» в заданных координатах на плоскости, «значения эксплуатационных факторов ситуационного дерева», «частные спектры безопасности ситуационного дерева», «интегральные спектры безопасности ситуационного дерева», «ситуационное дерево» и «хронология событий полёта», «ситуационное дерево» в нормальной земной системе координат, «ситуационное дерево» и «интегральные спектры безопасности», «хронология событий полёта» и «интегральные спектры безопасности», «причинно-следственный механизм безопасности ситуационного дерева», «разбиение ситуационного дерева на кластеры равной безопасности», «структура шансов безопасности ситуационного дерева», «окно безопасности полёта ситуационного дерева», «динамическое окно безопасности полёта», «изменение структуры шансов безопасности».

4. Анализ безопасности гипотетической ситуации «Полёт условного беспилотного ЛА вблизи высотного объекта городской инфраструктуры»

4.1. Ситуационное дерево, окно безопасности, тактики управления

4.1.1. Ситуационное дерево. Проиллюстрируем принципы работы алгоритма обеспечения «встроенной» безопасности полёта ЛА на примере анализа гипотетической сложной ситуации «Полёт условного беспилотного ЛА вблизи высотного объекта городской инфраструктуры».

Для контроля эволюции состояния системы относительно ограничений и прогноза безопасности полёта ЛА в данной ситуации используется ситуационное дерево $S_6 \cdot \Gamma_{14}$: «Полёт БЛА на малой высоте, вариации (ошибки выбора) целевых углов наклона траектории и крена». Здесь: S_6 – базовый сценарий «Полёт БЛА на малой высоте» и Γ_{14} – эксплуатационная гипотеза, учитывающая вариации целевых углов наклона траектории и крена,

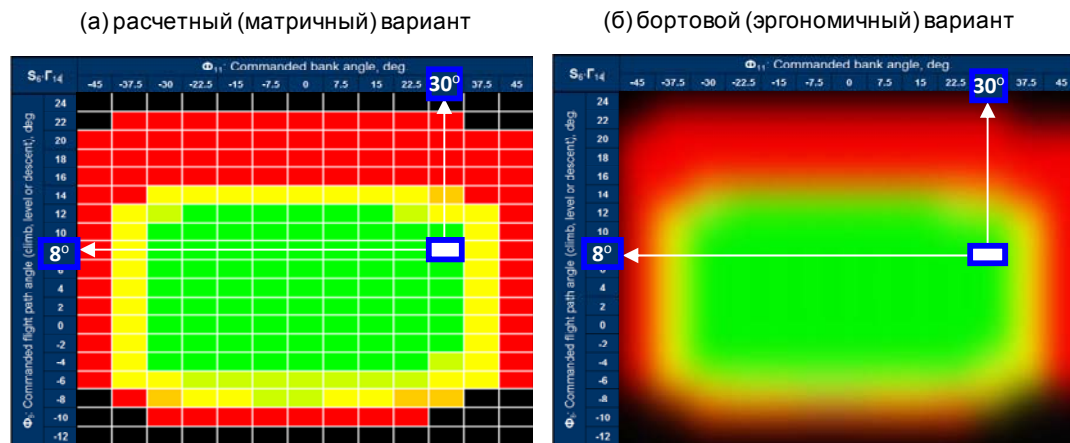
$$(44) \quad \Gamma_{14} = \Phi_8 \times \Phi_{11},$$

где $\Phi_8 \equiv \theta_{G2}$ – целевой угол наклона траектории движения в полёте с убранными закрылками ($\delta_3 = 0$), $\Omega(\theta_{G2}) = \{-12^\circ, -10^\circ, \dots, 24^\circ\}$, $\Phi_{11} \equiv \gamma_G$ – целевой угол крена, $\Omega(\gamma_G) = \{-45^\circ, -37,5^\circ, \dots, 45^\circ\}$. Соответственно, $N(S_6 \cdot \Gamma_{14}) = 247$.

4.1.2. Окно безопасности. На рис. 13 показаны два варианта исполнения окна безопасности, соответствующего дереву $S_6 \cdot \Gamma_{14}$: расчетный (матричный) вариант и бортовой («эргономичный» или «размытый») вариант.

«Топология» окна безопасности учитывает только внутренние свойства композиции $S_6 \cdot \Gamma_{14}$, без влияния препятствий. Во всех ситуациях из $S_6 \cdot \Gamma_{14}$, контролировались 20 ограничений для подмножества ключевых переменных x' ,

$$(45) \quad x' = \{V_{\text{пр}}, \beta, n_{ya}, Z_g, X_g, \gamma, \vartheta, V_{yg}, \alpha, \delta_{\text{ш}}, \delta_{\text{в}}, \delta_{\text{э}}, \delta_{\text{н}}, \delta_3\}.$$



Пояснения: Φ_8, Φ_{11} – координаты окна безопасности; $\Phi_8 \equiv \theta_{G2}$ – целевой угол наклона траектории при $\delta_3 = 0$, $\theta_{G2} \in \{-12^\circ; -10^\circ; \dots; +24^\circ\}$; $\Phi_{11} \equiv \gamma_G$ – целевой угол крена, $\gamma_G \in \{-45^\circ; -37,5^\circ; \dots; +45^\circ\}$; $\square$ – пример ячейки текущей цели управления, $(\theta_{G2}, \gamma_G) = (+8^\circ, +30^\circ)$; $\square, \square, \square, \square, \square$ – цвета категорий безопасности.

Рис. 13. Окно безопасности полёта, построенное для ситуационного дерева $S_6 \cdot \Gamma_{14}$: «Полёт БЛА на малой высоте, вариации (ошибки выбора) целевых углов наклона траектории и крена».

Из данных рис. 13 следует, что «топология» безопасности для композиции $S_6 \cdot \Gamma_{14}$ не имеет выраженных аномалий типа «обрыв» (см. рис. 11), которые могут отрицательно повлиять на безопасность полёта, за исключением вариантов полёта со снижением вблизи земной поверхности с большими углами наклона траектории θ_{G2} и крена γ_G в диапазоне

$$(46) \quad (\theta_{G2}; \gamma_G) \in (-8^\circ \dots -15^\circ; |37,5^\circ| \dots |45^\circ|).$$

В целом, для обеспечения безопасного пилотирования БЛА в заданных условиях у оператора имеется достаточно широкий выбор вариантов решений – тактических целей (θ_{G2}, γ_G) , $(\theta_{G2}; \gamma_G) \in (-4^\circ \dots 10^\circ; -30^\circ \dots 30^\circ)$. В качестве примера на рис. 13 показаны положение и координаты ячейки условной тактической цели $(\theta_{G2}; \gamma_G) = (8^\circ; 30^\circ)$ в окне безопасности.

4.1.3. Тактики управления. В рассматриваемой ситуации анализируются две тактики управления полётом БЛА:

- $S_0 \cup S_\downarrow$ – тактика управления террориста, «дурака» или неуправляемый полёт до столкновения с препятствием;
- $S_0 \cup S_\uparrow$ – тактика интеллектуальной системы управления, реализующей цель избежания столкновения на основе императива самосохранения.

Сценарии-составляющие $S_0, S_\downarrow, S_\uparrow$, используемые в тактиках $S_0 \cup S_\downarrow$ и $S_0 \cup S_\uparrow$, образуют следующие сегменты ситуации: S_0 : «приближение к препятствию», $S_\downarrow$: «неизбежное столкновение» и $S_\uparrow$: «избежание столкновения».

В тактике $S_0 \cup S_\downarrow$ летательный аппарат, выполняя левый вираж в горизонтальной плоскости с целевыми параметрами $(\theta_{G2}; \gamma_G) = (0; -15^\circ)$, приближается к препятствию по траектории, которая неизбежно ведет к столкновению. Пусть тактика $S_0 \cup S_\downarrow$ является заданной, то есть реализуемой оператором. Описание процесса управления на основе $S_0 \cup S_\downarrow$ дается в п. 4.3.

В тактике $S_0 \cup S_\uparrow$ летательный аппарат осуществляет маневр ухода от столкновения с препятствием – автоматически или полуавтоматически, выполняя правый вираж с набором высоты с параметрами, соответствующими цели $(\theta_{G2}; \gamma_G) = (6; 30^\circ)$, полученной в результате принятия решения.

Тактика $S_0 \cup S_\uparrow$ реализует многоступенчатый процесс анализа ситуации и принятия решений, осуществляемый моделью искусственно-интеллектуальной системы безопасности на основе «императива самосохранения».

Под «императивом самосохранения» здесь понимается правило, основанное на использовании базы знаний $\Omega(T)$, цель которого состоит в блокировании перехода ЛА в катастрофическое состояние при любых обстоятельствах: по незнанию, халатности, неадекватности или злостному умыслу оператора, действию других обстоятельств, ведущих ситуацию к необратимому исходу. Описание процесса управления и принятого решения на основе $S_0 \cup S_\uparrow$ дается в п. 4.4.

В эксперимент принято допущение о том, что в процессе реализации каждого сегмента тактики текущая тактическая цель управления ЛА не изменяется, то есть

$$(47) \quad (\theta_{G2}; \gamma_G) = (0; -15^\circ) \equiv \text{const} \text{ для тактики } S_0 \cup S_\downarrow$$

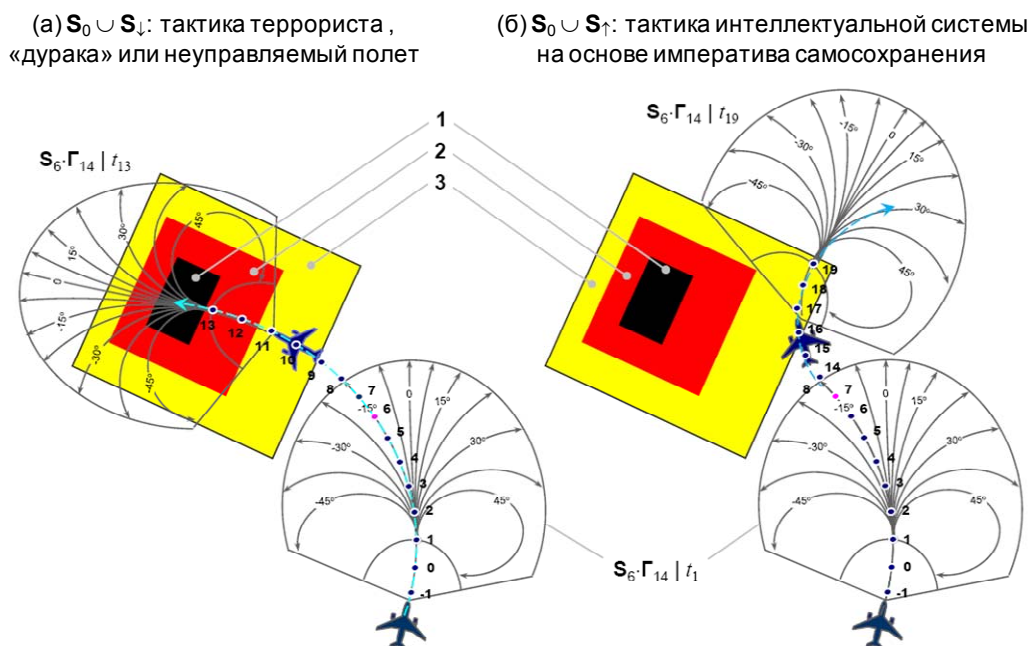
и

$$(48) \quad (\theta_{G2}; \gamma_G) = (6^\circ; 30^\circ) \equiv \text{const} \text{ для тактики } S_\uparrow.$$

4.2. Схема ситуации

4.2.1. Проекция. Схема развития ситуации «Полёт условного БЛА вблизи высотного объекта городской инфраструктуры» для тактик управления $S_0 \cup S_\downarrow$ и $S_0 \cup S_\uparrow$ представлена на рис. 14 и 15 в проекциях, соответственно, на гори-

зонтальную и боковую плоскости нормальной земной системы координат. Масштаб и пропорции на всех рисунках являются приблизительными.



Пояснения: 1 – препятствие (высотное здание); 2 – «красная» зона нечеткого ограничения препятствия; 3 – «желтая» зона нечеткого ограничения препятствия; ■, ■ – цвета безопасности; $S_6 \cdot \Gamma_{14} | t_i$ – плановая проекция дерева ситуационного прогноза $S_6 \cdot \Gamma_{14}$ в момент времени t_i , $i = 1, 13, 19$; t_1 – начальный момент времени; t_{13} – момент времени перед столкновением; t_{19} – момент времени после безопасного разрешения ситуации; S_0 – сценарий «сближение с препятствием»; $S_{\downarrow}$ – сценарий «неизбежное столкновение»; $S_{\uparrow}$ – сценарий «уход от столкновения»; Γ_{14} – эксплуатационная гипотеза; $\{-45^\circ; -30^\circ; \dots; 45^\circ\}$ – выборочные значения целевого угла крена на плановой проекции дерева; $\{0, 1, 2, \dots, 7, 8, 9, \dots, 13\}$ – дискретная шкала шагов реализации тактики $S_0 \cup S_{\downarrow}$; $\{0, 1, 2, \dots, 7, 14, 15, \dots, 19\}$ – дискретная шкала шагов реализации тактики $S_0 \cup S_{\uparrow}$; масштаб и пропорции условные.

Рис. 14. Две тактики полёта ЛА вблизи объекта городской инфраструктуры (база знаний $S_6 \cdot \Gamma_{14}$) – вид ситуации в плане.

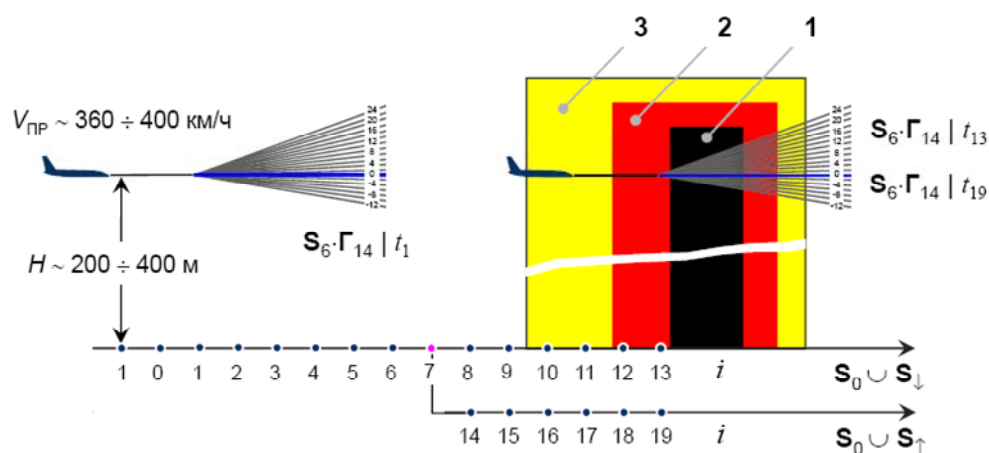
4.2.2. Дискретные шкалы и моменты времени. Сценариям $S_0, S_{\downarrow}, S_{\uparrow}$, образующим тактики $S_0 \cup S_{\downarrow}$ и $S_0 \cup S_{\uparrow}$, соответствуют следующие дискретные шкалы времени процесса принятия решений (рис. 14, 15):

- шкала $\{t_0, \dots, t_7\}$ – для сценария S_0 : «приближение к препятствию»;
- шкала $\{t_8, \dots, t_{13}\}$ – для сценария $S_{\downarrow}$: «неизбежное столкновение»;
- шкала $\{t_{14}, \dots, t_{19}\}$ – для сценария $S_{\uparrow}$: «избегание столкновения».

На рис. 14 схематически показаны положения поддерева прогноза $S_6 \cdot \Gamma_{14} | t_i$ для трех моментов времени t_i :

- t_1 – начальный момент времени;
- t_{13} – момент времени перед столкновением ($S_0 \cup S_{\downarrow}$);
- t_{19} – момент времени после безопасного разрешения ситуации ($S_0 \cup S_{\uparrow}$).

4.2.3. Положение препятствия и ограничений. На рис. 14 и 15 показано положение препятствия (высотное здание, проекции здания окрашены в чёрный цвет). Там же изображены две виртуальные зоны нечёткого ограничения препятствия – «красная» и «желтая».



Пояснения: 1 – препятствие (высотное здание); 2 – «красная» зона нечеткого ограничения препятствия; 3 – «желтая» зона нечеткого ограничения препятствия; ■ ■ ■ – используемые цвета палитры безопасности; $S_6 \cdot \Gamma_{14} | t_k$ – боковая проекция дерева ситуационного прогноза $S_6 \cdot \Gamma_{14}$ в момент времени $t, i = 1, 13, 19$; t_1 – начальный момент времени; t_{13} – момент времени перед столкновением; S_6 – сценарий базовой ситуации; Γ_{14} – эксплуатационная гипотеза; $V_{пр} \sim 360 \div 400$ км/ч – приборная скорость полета; $H \sim 200 \div 400$ м – высота полета; $\{-12^\circ; -8^\circ; \dots; +24^\circ\}$ – выборочные значения целевого угла наклона траектории на боковой проекции; i – номер шага принятия решения, $i \in \{0, 1, 2, \dots, 19\}$; $\{0, 1, 2, \dots, 7, 8, 9, \dots, 13\}$ – дискретная шкала шагов реализации тактики $S_0 \cup S_{\downarrow}$; $\{0, 1, 2, \dots, 7, 14, 15, \dots, 19\}$ – дискретная шкала шагов реализации тактики $S_0 \cup S_{\uparrow}$; масштаб и пропорции условные.

Рис. 15. Две тактики полёта ЛА вблизи объекта городской инфраструктуры (база знаний $S_6 \cdot \Gamma_{14}$) – вид ситуации сбоку.

«Зеленая» зона ограничения (безопасная часть пространства, находящаяся на достаточном удалении от препятствия и продолжающая «желтую» зону во вне), на рис. 14 и 15 не окрашена для облегчения восприятия ситуации.

4.2.4. Исходное состояние системы. Горизонтальный полёт ЛА проходит на высоте $H \approx 200 \div 400$ м со скоростью $V_{пр} \approx 360 \div 400$ км/ч.

Состояние системы в начале ситуации (момент времени t_0) схематически представлено на рис. 16.

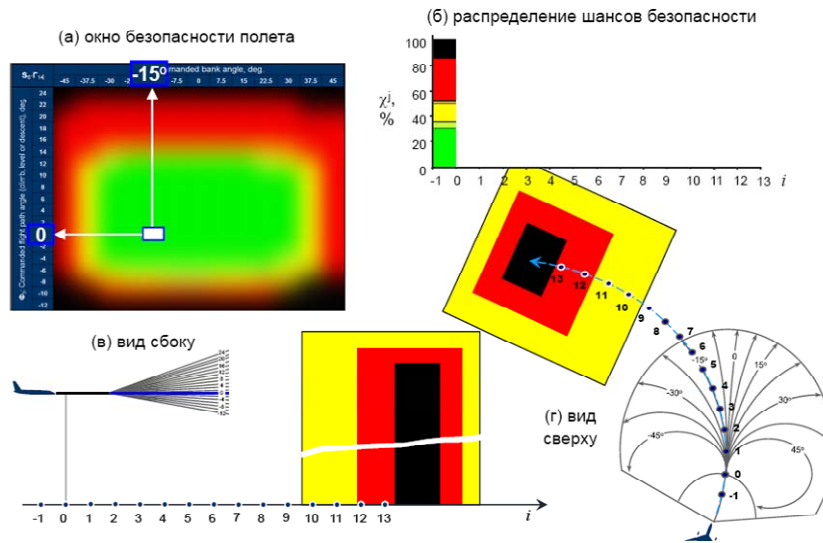
На рис. 16 также показано исходное состояние окна безопасности полёта, $W(\Phi_8, \Phi_{11})|t_0$, и диаграммы изменения структуры шансов безопасности, $\chi^j = f(t_0), j = \text{I, II, ..., V}$.

4.3. Применение тактики $S_0 \cup S_{\downarrow}$

4.3.1. Анализируемые формы. В ситуации применения тактики $S_0 \cup S_{\downarrow}$ изменение состояния безопасности полёта во времени иллюстрируется схемами положения БЛА относительно препятствия в моменты времени $t_0, t_1, t_3, t_5, \dots, t_{13}$. В частности, из данных рис. 14 следует, что:

- момент t_0 соответствует состоянию «препятствий впереди нет»;
- момент t_{13} соответствует состоянию «мгновение до столкновения».

Эволюция состояния безопасности системы в процессе принятия решений согласно сценарию $S_0 \cup S_{\downarrow}$ иллюстрируется для последовательности нечётных моментов времени $\{t_1, t_3, \dots, t_{13}\}$.



Пояснения: Φ_8, Φ_{11} – координаты окна безопасности; $\Phi_8 \equiv \theta_{G2}$ – целевой угол наклона траектории при $\delta_s = 0$, $\theta_{G2} \in \{-12^\circ; -10^\circ; \dots; +24^\circ\}$; $\Phi_{11} \equiv \gamma_G$ – целевой угол крена, $\gamma_G \in \{-45^\circ; -37,5^\circ; \dots; +45^\circ\}$; $\square$ – ячейка текущей цели управления ЛА, $(\theta_{G2}, \gamma_G) = (0, -15^\circ)$; $\square$ – цвета категорий безопасности; χ^i – относительное количество ситуаций из S_6, Γ_{14} , принадлежащих категории $\xi_j, j \in \{I, II-a, II-b, III, IV, V\}$; $\{-12^\circ; -8^\circ; \dots; +24^\circ\}$ – выборочные значения целевого угла наклона траектории на боковой проекции дерева; $\{-45^\circ; -30^\circ; \dots; +45^\circ\}$ – выборочные значения целевого угла крена на плановой проекции дерева; i – номер шага процесса, $i \in \{0, 1, \dots, 13\}$; масштаб и пропорции условные.

Рис. 16. Сценарий S_0 : сближение с препятствием (начало ситуации t_0).

Для анализа результатов моделирования используются две графоаналитические формы: динамическое окно безопасности $W(\Phi_8, \Phi_{11})|t_i$, построенное для последовательности нечётных моментов времени $t_i, t_i \in \{t_1, t_3, \dots, t_{13}\}$, и диаграмма изменения структуры шансов безопасности во времени:

$$\chi^j = f(t_i), \chi^j = f(t_i), t_i \in \{t_1, t_3, \dots, t_{13}\}, j = I, II, \dots, V.$$

Кроме того, в каждый анализируемый момент времени t_i схематически показываются положение ЛА, препятствие, нечёткие ограничения препятствия и две проекции дерева ситуационного прогноза.

4.3.2. Результаты моделирования сценария S_0 («приближение к препятствию»). Результаты моделирования полётной ситуации на участке реализации сценария S_0 представлены на рис. 17-20. Здесь в хронологическом порядке показаны четыре состояния дерева ситуационного прогноза, окна безопасности $W(\Phi_8, \Phi_{11})|t_i$ и структуры шансов безопасности $\chi^j = f(t_i)$, в нечётные моменты времени t_i сценария S_0 , $t_i = t_1, t_3, t_5, t_7$.

Графические иллюстрации состояний ситуации, соответствующих четным моментам времени $\{t_2, t_4, t_6\}$, опущены. Тем не менее, все состояния окна безопасности, соответствующие всем моментам времени $t_0, t_1, t_3, t_5, \dots, t_{13}$ процесса реализации тактики $S_0 \cup S_{\downarrow}$, будут проанализированы ниже.

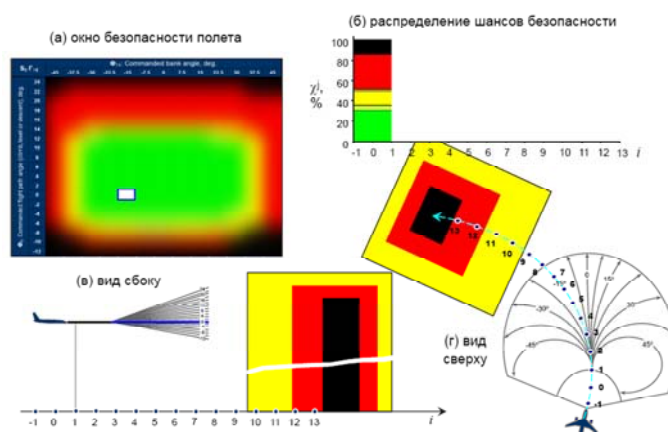


Рис. 17. Сценарий S_0 : сближение с препятствием (момент времени t_1).

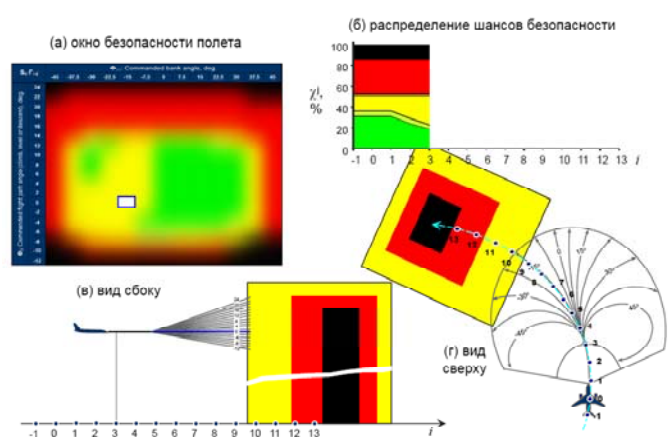


Рис. 18. Сценарий S_0 : сближение с препятствием (момент времени t_3).

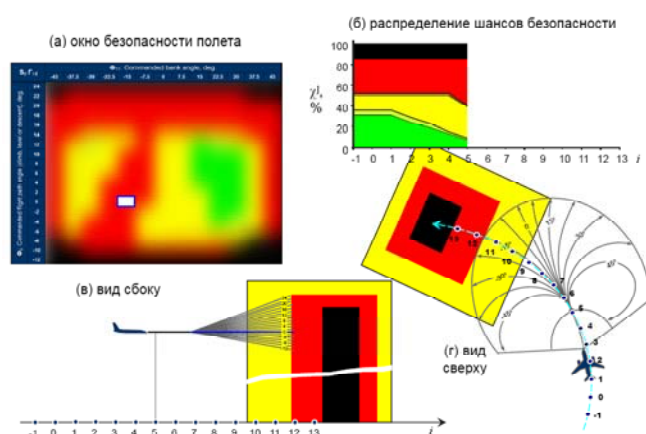


Рис. 19. Сценарий S_0 : сближение с препятствием (момент времени t_5).

4.3.3. Результаты моделирования сценария $S_{\downarrow}$ («неизбежное столкновение»). Результаты моделирования $S_{\downarrow}$ представлены на рис. 21-23. Показаны последовательные состояния дерева прогноза, окна безопасности $W(\Phi_8, \Phi_{11})|t_i$ и структуры шансов безопасности $\chi^j = f(t_i)$, $t_i = t_9, t_{11}, t_{13}$, начиная с момента t_9 .

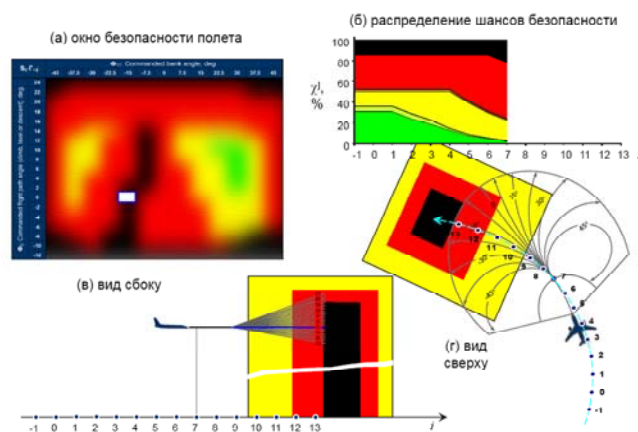


Рис. 20. Сценарий S_0 : сближение с препятствием (момент времени t_7).

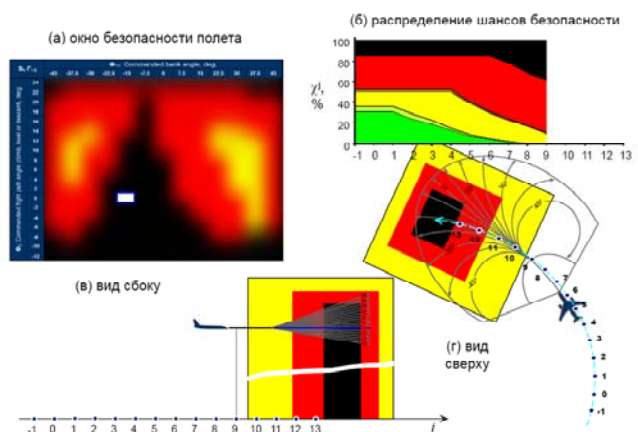


Рис. 21. Сценарий $S_{\downarrow}$: неизбежное столкновение, момент времени t_9 .

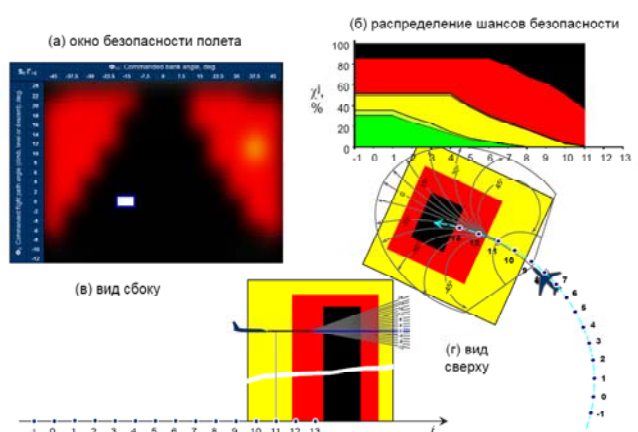


Рис. 22. Сценарий $S_{\downarrow}$: неизбежное столкновение, момент времени t_{11} .

4.3.4. Краткий анализ результатов применения тактики $S_0 \cup S_{\downarrow}$. Рассмотрим состояния форм $W(\Phi_8, \Phi_{11})|t_i$ и $\chi^j = f(t_i)$, показанные на рис. 17-23,

а также состояния, соответствующие четным моментам времени $\{t_2, t_4, t_6, t_8, t_{10}, t_{12}\}$. Результаты анализа тактики $S_0 \cup S_{\downarrow}$ сведены в таблицу 2.

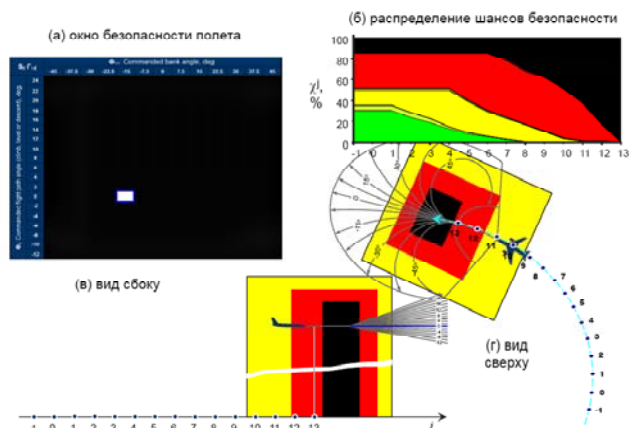
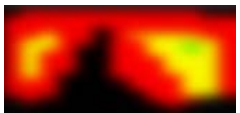
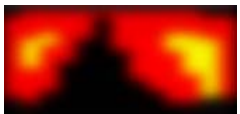
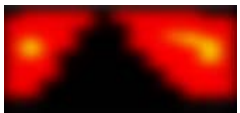


Рис. 23. Сценарий $S_{\downarrow}$: неизбежное столкновение, момент времени t_{13} .

Таблица 2. Анализ применения тактики $S_0 \cup S_{\downarrow}$.

S	t_i	$W(\Phi_8, \Phi_{11}) t_i$	Результаты анализа состояния окна безопасности
S_0	t_1		Выполняя левый горизонтальный вираж, ЛА приближается к препятствию. Текущая цель управления задана углами наклона траектории и крена: $(\theta_{G2}; \gamma_G) = (0; -15^\circ)$. Окно безопасности не содержит новых угроз – см. рис. 16.
	t_2		Концы отдельных ветвей дерева прогноза, соответствующие небольшим отрицательным значениям целевого угла крена, проникли в «желтую» зону нечёткого ограничения препятствия. Соответствующие пары ячеек $(\theta_{G2}; \gamma_G)$ окрасились в желтый цвет.
	t_3		Все большее количество ветвей дерева прогноза углубляется в «желтую» зону ограничения препятствия. «Желтая» область в окне безопасности расширяется, накрывая ячейку текущей цели.
	t_4		«Желтая» область условно-безопасных II-b сценариев полёта накрыла почти всю левую часть «долины» в окне безопасности к моменту времени t_4 .
	t_5		Отдельные ветви дерева прогноза, в том числе текущая ветвь $(\theta_{G2}; \gamma_G) = (0; -15^\circ)$, проникли в «красную» зону нечёткого ограничения здания. «Желтая» область в окне безопасности расширяется.
	t_6		В окне безопасности «красная» область сценариев расширяется, замещая «желтую» и по-прежнему накрывая ячейку текущей цели.
	t_7		В окне безопасности впервые появилась новая «чёрная» область («пропасть»). При этом в нее сразу попала ячейка текущей цели $(\theta_{G2}; \gamma_G) = (0; -15^\circ)$. Наложение «чёрной» области и текущей цели является сигналом о необходимости принятия решения.

S	t_i	$W(\Phi_8, \Phi_{11}) t_i$	Результаты анализа состояния окна безопасности
$S_{\downarrow}$	t_8		«Чёрная» область в окне безопасности расширяется за счет сужения остальных более безопасных областей. Целевая ячейка остается в «чёрной» области. ЛА по-прежнему движется по траектории столкновения с препятствием.
	t_9		В окне безопасности не осталось ни одного «зеленого острова», то есть безопасного сценария. Удельный вес «чёрных» сценариев увеличивается, а «красных» – не изменяется по сравнению с предыдущим состоянием.
	t_{10}		В окне безопасности почти не осталось даже условно-безопасных («желтых») сценариев. Катастрофическая тенденция усугубляется, не оставляя сомнения в исходе ситуации.
	t_{11}		«Чёрная» область («пропасть») занимает более 60% площади окна безопасности. Остальная часть – это, в основном, опасные («красные») сценарии, которые соответствуют полёту в непосредственной близости от препятствия.
	t_{12}		«Пропасть» расширяется, занимая более 80% площади окна безопасности. Катастрофическая тенденция в ситуации ускоряется. Шансы столкновения с препятствием очень высоки и продолжают увеличиваться.
	t_{13}		Область катастрофических сценариев полностью покрывает окно безопасности. При любых значениях (θ_{G2}, γ_G) столкновение с препятствием неизбежно, и произойдет оно через мгновения (1-3 с), в зависимости от величины шага наблюдения, глубины прогноза и динамики системы.

4.4. Применение тактики $S_0 \cup S_{\uparrow}$

4.4.1. Анализируемые формы. В ситуации применения тактики $S_0 \cup S_{\uparrow}$ изменение состояния безопасности во времени иллюстрируется схемами относительного положения БЛА и препятствия в последовательные моменты времени $t_{14}, t_{15}, \dots, t_{19}$. Из данных рис. 14 следует, что момент времени t_{14} соответствует началу реализации решения об уводе ЛА от столкновения, а момент t_{19} – конечному состоянию «безопасное разрешение ситуации». Для анализа результатов моделирования используются динамическое окно безопасности $W(\Phi_8, \Phi_{11})|t_i$, построенное для моментов времени $t_i \in \{t_{14}, t_{15}, t_{16}, \dots, t_{19}\}$, и диаграмма изменения структуры шансов безопасности во времени: $\chi^j = f(t_i)$, $t_i \in \{t_{14}, t_{15}, t_{16}, \dots, t_{19}\}$, $j = \text{I, II, ..., V}$. Кроме того, для каждого момента времени t_i на рисунках показаны положение ЛА, препятствие, ограничения и проекция дерева прогноза ситуации.

4.4.2. Идентификация «точка возврата» $t_{\uparrow}$. Результаты моделирования тактики $S_0 \cup S_{\downarrow}$ показывают, что момент времени t_7 следует рассматривать как последнюю возможность для восстановления безопасного режима.

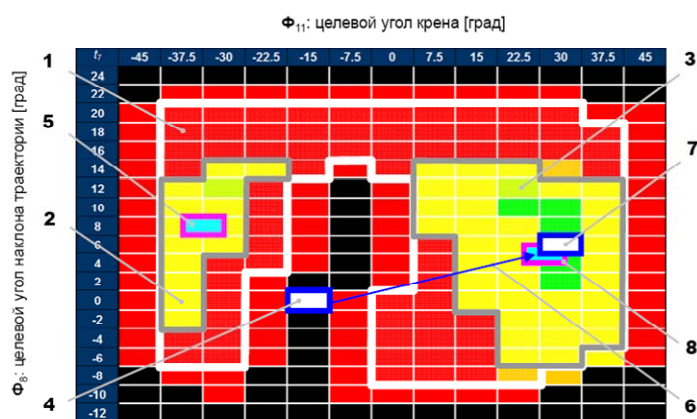
В данной ситуации объективно существует «точка возврата» $t_{\uparrow}$ – точка последнего шанса для восстановления безопасного режима. Это состояние системы, зафиксированное в момент t_7 (рис. 20), при котором «чёрная» область («пропасть»), возникшая в окне безопасности вследствие обнаружения препятствия впереди по прогнозируемой траектории движения, впервые перекрывает

ячейку цели $(\theta_{G2}; \gamma_G) = (0; -15^\circ)$. «Точка возврата» определяется автоматически в момент t_7 , $t_{\uparrow} \equiv t_7$, используя следующий критерий:

$$(49) \quad (\theta_{G2}/\gamma_G(t - \Delta) \notin w|\xi^V \wedge \theta_{G2}/\gamma_G(t) \in w|\xi^V) \Rightarrow t = t_{\uparrow},$$

где t – текущее время, Δ – шаг наблюдения состояния системы (принятия решений), $w|\xi^V$ – ячейка окна безопасности, принадлежащая категории V .

4.4.3. Анализ состояния окна безопасности в «точке возврата» $t_{\uparrow}$. На рис. 24 показано состояние окна безопасности в «точке возврата» $t_{\uparrow} \equiv t_7$. Эта точка соответствует принятию решения о смене сценария управления $S_0 \rightarrow S_{\uparrow}$.



Пояснения: Φ_8 , Φ_{11} – координаты окна безопасности; $\Phi_8 \equiv \theta_{G2}$ – целевой угол наклона траектории при $\delta_s = 0$, $\theta_{G2} \in \{-12^\circ; -10^\circ; \dots; +24^\circ\}$; $\Phi_{11} \equiv \gamma_G$ – целевой угол крена, $\gamma_G \in [-45^\circ; -37,5^\circ; \dots; +45^\circ]$; 1 – область сценариев некатастрофических ситуаций с запасом безопасности $\Delta\Phi$, $\Delta\Phi \equiv (\Delta\theta_{G2}, \Delta\gamma_G) = (2^\circ, 7,5^\circ)$; 2 и 3 – области безопасных и условно-безопасных сценариев («острова безопасности»); 5 и 8 – «центры тяжести» левого и правого «островов безопасности»; 4 и 7 – старая и новая ячейки тактической цели; 6 – сдвиг ячейки тактической цели при выборе сценария $S_{\uparrow}$; ■■■■■■ – цвета категорий безопасности.

Рис. 24. Состояние окна безопасности в «точке возврата» $t_{\uparrow}$, $t_{\uparrow} \equiv t_7$. Обоснование выбора параметров для смены сценария управления.

На рис. 24 показаны элементы окна безопасности в момент $t_{\uparrow} \equiv t_7$:

- область некатастрофических сценариев, построенная с запасом безопасности $\Delta\Phi$ по целевым углам наклона траектории и крена,

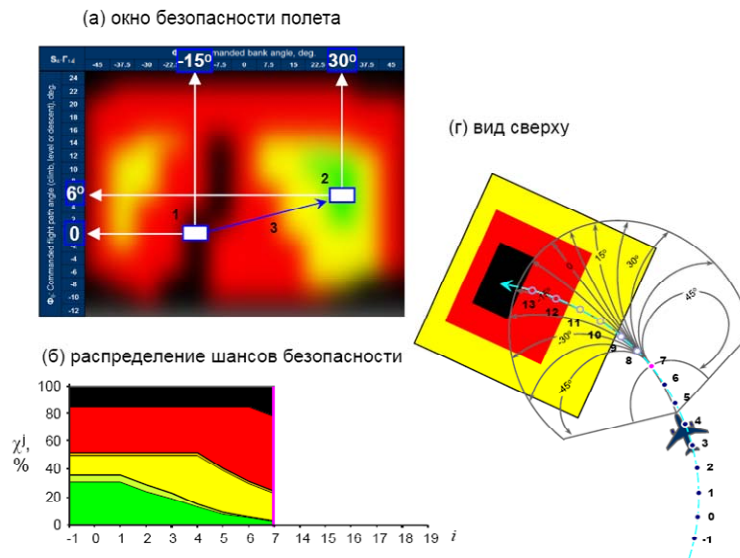
$$(50) \quad \Delta\Phi \equiv (\theta_{G2}; \gamma_G) = (2^\circ; 7,5^\circ);$$

- области безопасных и условно-безопасных сценариев («острова безопасности»), которые характеризуются зеленой, салатовой или желтой окраской;
- «центры тяжести» левого и правого «островов безопасности»;
- старая (чреватая катастрофой) и новая (восстанавливающая безопасность) ячейки тактической цели – заданных углов наклона траектории и крена;
- потребный сдвиг ячейки тактической цели при принятии решения.

4.4.4. Выбор новой цели в «точке возврата». Из анализа состояния окна безопасности в момент времени t_7 следует, что для обеспечения безопасности полёта в условиях нарастающей угрозы столкновения, которая превысила порог принятия решения $(\chi^{\text{IV}} + \chi^{\text{V}}) > \chi_{\text{max}}$, тактическая цель должна быть изменена для увода ЛА от столкновения на основе императива самосохранения.

Новая цель соответствует паре значений $(\theta_{G2}; \gamma_G) = (6^\circ; 30^\circ)$. Это координаты ячейки окна безопасности, которая наиболее близко расположена к расчетному «центру тяжести» правого «острова безопасности» (рис. 24). Выбор правого «острова безопасности» в качестве источника восстанавливающего сценария управления обусловлен большей площадью, то есть более высоким потенциалом безопасности последнего по сравнению с левым «островом безопасности».

Механизм принятия решения в «точке возврата» $t_\uparrow$ на основе императива самосохранения и автоматической смены цели иллюстрируется рис. 25. Видно, что для принятия решения сложные вычисления не требуются.



Пояснения: Φ_8, Φ_{11} – вертикальная и горизонтальная координаты окна безопасности; $\Phi_8 \equiv \theta_{G2}$ – целевой угол наклона траектории при $\delta_3 = 0$, $\theta_{G2} \in \{-12^\circ; -10^\circ; \dots; +24^\circ\}$; $\Phi_{11} \equiv \gamma_G$ – целевой угол крена, $\gamma_G \in [-45^\circ; -37,5^\circ; \dots; +45^\circ]$; $\square$ – ячейки тактических целей; 1 – старая ячейка-цель, чреватая катастрофой, $(\theta_{G2}, \gamma_G)_1 = (0, -15^\circ)$; 2 – новая ячейка-цель, восстанавливающая безопасность полета, $(\theta_{G2}, \gamma_G)_2 = (6^\circ, 30^\circ)$; 3 – потребный сдвиг ячейки тактической цели при принятии решения о выборе сценария $S_\uparrow$; $\square$ – цвета категорий безопасности; χ^j – относительное количество ситуаций из $S_6 \cdot \Gamma_{14}$, принадлежащих категории ξ^j , $j \in \{I, II-a, II-b, III, IV, V\}$; $\{-45^\circ; -30^\circ; \dots; 45^\circ\}$ – выборочные значения целевого угла крена на плановой проекции дерева; i – номер шага процесса принятия решения, $i \in \{0, 1, \dots, 13, 14, 15, \dots, 19\}$; масштаб и пропорции условные.

Рис. 25. Принятие решения о самосохранении в «точке возврата» $t_\uparrow$ ($S_0 \rightarrow S_\uparrow$)

и автоматическая смена тактической цели.

Данный механизм является обобщенным, так как он не зависит от класса ситуаций и конкретных значений параметров текущей ситуации. Вся предварительная расчетная и аналитическая работа аккумулирована в ситуационных деревьях. В этом смысле модель искусственного интеллекта, разрабатываемая в рамках знаниецентрического подхода, может быть названа антропоморфной, поскольку её решения основываются на памяти накопленных знаний.

4.4.5. Результаты моделирования сценария $S_\uparrow$: «избежание столкновения». Результаты моделирования ситуации на участке сценария $S_\uparrow$ представлены на рис. 26-31. Показаны шесть последовательных состояний дерева прогноза $S_6 \cdot \Gamma_{14} | t_i$, окна безопасности $W(\Phi_8, \Phi_{11}) | t_i$ и структуры шансов безопасности $\chi^j = f(t_i)$, $t_i = t_{14}, t_{15}, \dots, t_{19}$, начиная с момента времени t_{14} , $j = I, II, \dots, V$.

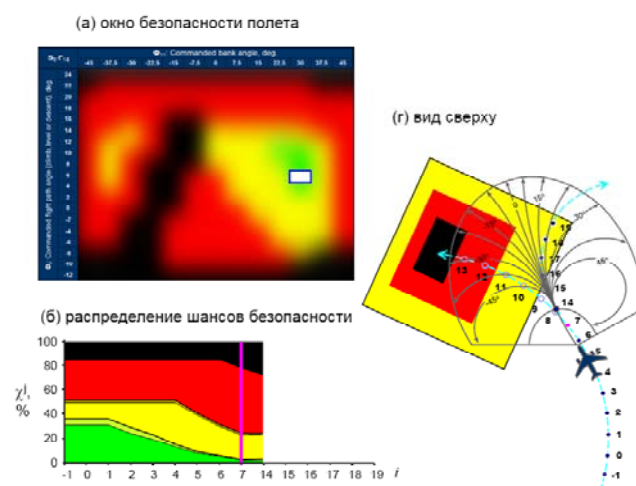


Рис. 26. Сценарий $S_{\uparrow}$: избежание столкновения, момент времени t_{14} .

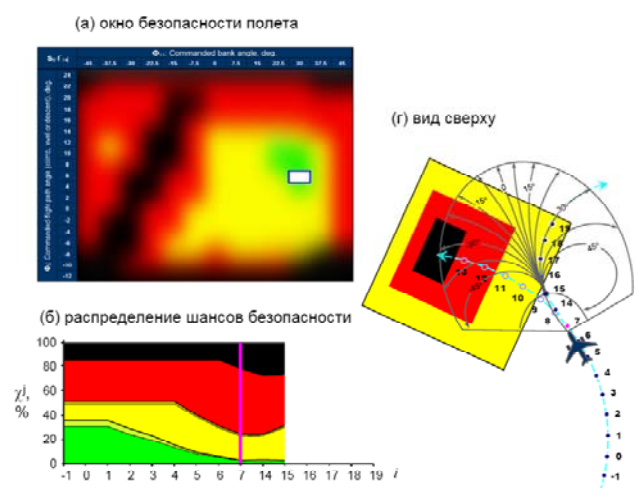


Рис. 27. Сценарий $S_{\uparrow}$: избежание столкновения, момент времени t_{15} .

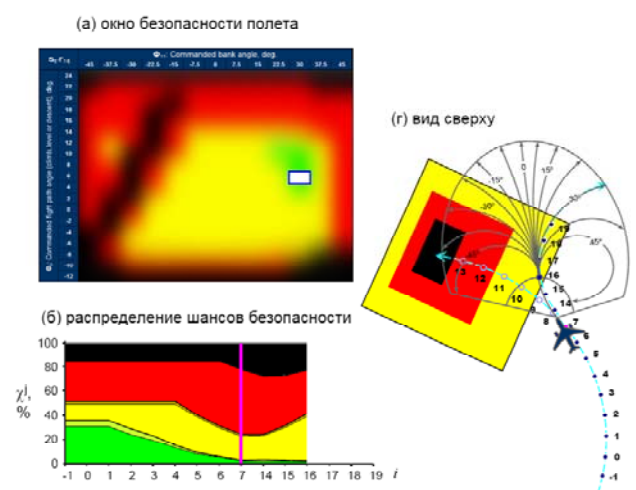


Рис. 28. Сценарий $S_{\uparrow}$: избежание столкновения, момент времени t_{16} .

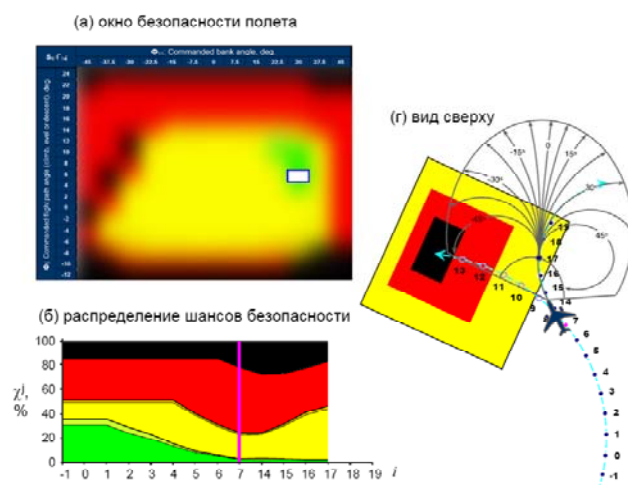


Рис. 29. Сценарий $S_{\uparrow}$: избегание столкновения, момент времени t_{17} .

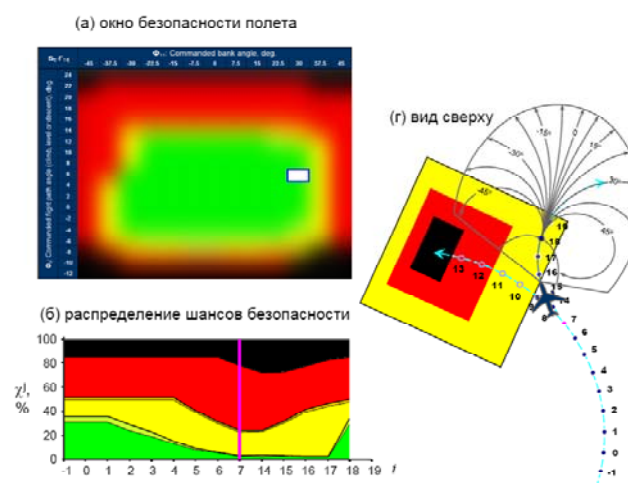


Рис. 30. Сценарий $S_{\uparrow}$: избегание столкновения, момент времени t_{18} .

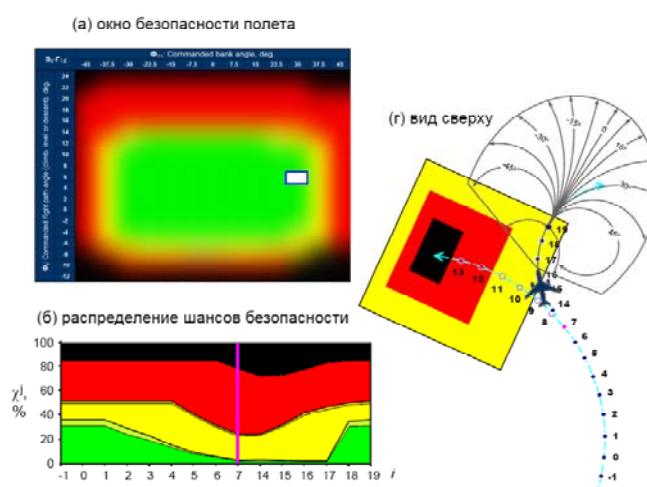
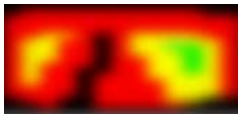
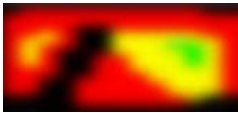
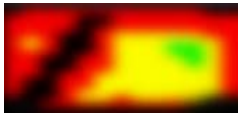
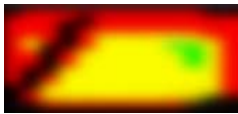
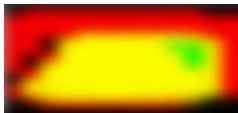
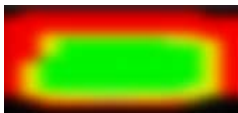
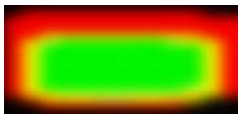


Рис. 31. Сценарий $S_{\uparrow}$: избегание столкновения, момент времени t_{19} .

4.4.6. Краткий анализ результатов применения тактики $S_0 \cup S_{\uparrow}$. Рассмотрим состояние форм $W(\Phi_8, \Phi_{11})|t_i$ и $\chi^j = f(t_i)$ в моменты времени t_i , $t_i = t_{14}, t_{15}, \dots, t_{19}$, $j = I, II, \dots, V$, в результате применения тактики $S_0 \cup S_{\uparrow}$ (см. рис. 26-31). Анализ сегмента S_0 не повторяется (см. таблицу 2). Результаты анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3. Анализ применения тактики $S_0 \cup S_{\uparrow}$.

S	t_i	$W(\Phi_8, \Phi_{11}) t_i$	Результаты анализа состояния окна безопасности
$S_{\uparrow}$	$t_{\uparrow}$		Первое закрытие ячейки цели $(\theta_{G2}; \gamma_G) = (0; -15^\circ)$ «чёрной» областью – это сигнал для принятия решения ($t_{\uparrow} \equiv t_7$). Угроза столкновения ($\chi^{IV} + \chi^V$) превысила порог срабатывания алгоритма $\chi_{\max}$, и для увода ЛА от препятствия выбирается новая цель: $(\theta_{G2}; \gamma_G) = (6^\circ; 30^\circ)$.
	t_{14}		«Чёрная» область в окне безопасности продолжает расширяться (ввиду инерционных свойств ЛА). Площадь «красной» области начинает сокращаться, а «желтой» остается без изменений. Однако, ячейка тактической цели располагается вне катастрофической и опасной областей.
	t_{15}		Впервые в ситуации появляется положительная тенденция: реализуется процесс восстановления безопасного режима. «Желтая» область сценариев в окне безопасности расширяется за счет сокращения площади «красной» области.
	t_{16}		Видна положительная динамика восстановления безопасности полёта. Площадь «желтой» области сценариев расширяется, а «красной» – сокращается. Впервые наблюдается сокращение площади «чёрной» области
	t_{17}		«Чёрная» область в окне безопасности, индуцированная препятствием, почти исчезла. Видно, что положительная тенденция в ситуации стала необратимой. «Желтая» область продолжает расширяться.
	t_{18}		Исходное состояние окна безопасности почти восстановлено, за исключением левого верхнего угла, где для ряда альтернативных сценариев еще сохраняется риск столкновения. Близится окончание маневра увода ЛА от столкновения с препятствием.
	t_{19}		В данный момент времени процесс восстановления безопасного режима движения завершен. Исходное состояние окна безопасности, соответствующее динамике системы без препятствия, восстановлено.

4.4.7. Графоаналитические формы более высокого уровня обобщения знаний. Результаты вычислительного эксперимента дают основу для создания новых графических форм («карт знаний») с более высоким уровнем обобщения знаний.

На рис. 32 представлено дерево динамических окон прогноза безопасности, построенное на шкалах времени $\{t_0, \dots, t_7\}$, $\{t_8, \dots, t_{13}\}$ и $\{t_{14}, \dots, t_{19}\}$.

В частности, на рис. 32 наглядно показано, как эволюция «топологии» безопасности зависит от тактики управления и времени. Также видна критическая важность физико-логического обоснования и своевременности принятия решения о смене тактики управления.

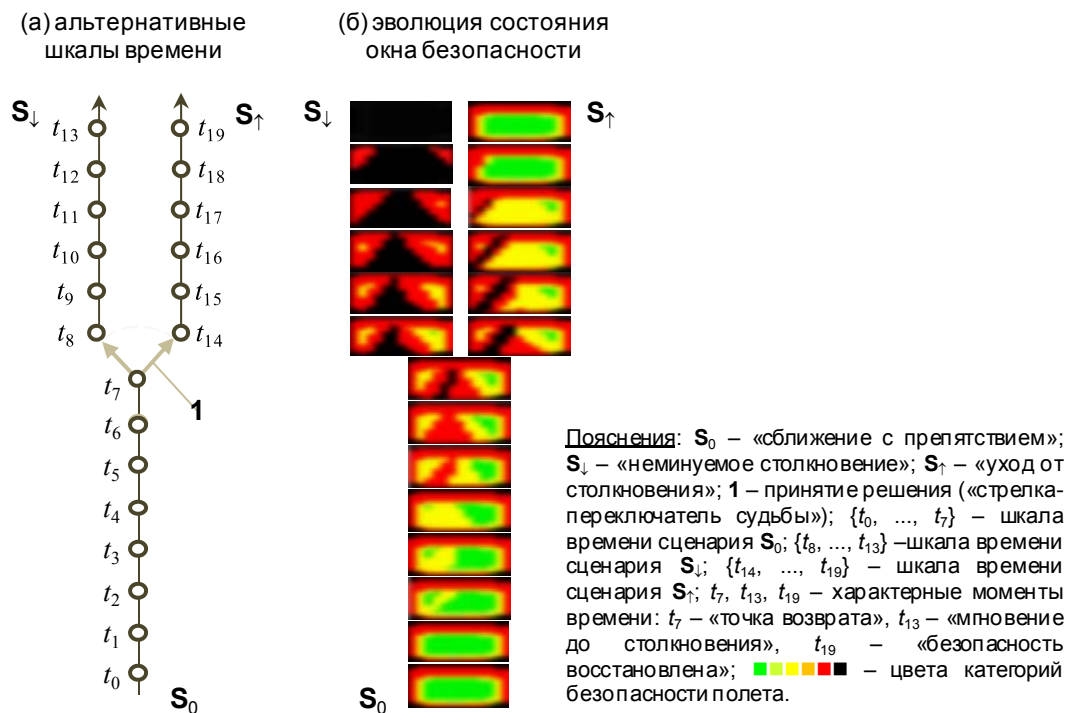


Рис. 32. Хронология ветвления ситуации. Эволюция «топологии» безопасности в зависимости от принятого решения (вид дерева окон безопасности «с высоты птичьего полёта»).

На рис. 33 показана диаграмма изменения структуры шансов безопасности для двух тактик управления при полёте вблизи объекта городской инфраструктуры. На диаграмме выделены следующие характерные состояния динамики безопасности ЛА:

(51) $(A, B, C, \dots, L)$.

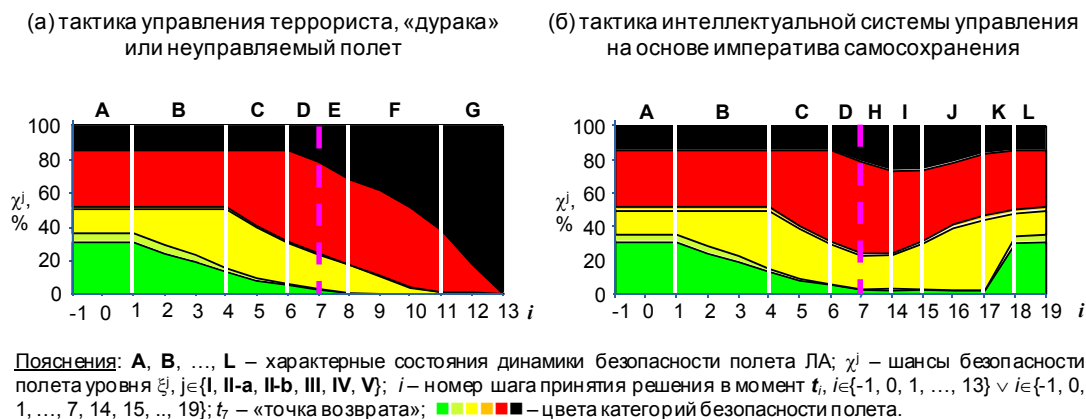


Рис. 33. Динамика изменения структуры шансов безопасности для двух тактик управления полётом ЛА вблизи объекта городской инфраструктуры (база знаний $S_6 \cdot \Gamma_{14}$).

Из данных рис. 33 видно, что характерные состояния безопасности $(A, B, C, \dots, L)$ связаны с тактикой управления и производными от параметров

χ^j по времени, $j = \text{I, II, ..., V}$. Состояния (A, B, C, ..., L) могут использоваться для принятия решений в более сложных вариантах эволюции «топологии» безопасности, чем показано в рассмотренном примере.

Таким образом, разработанные концепции макроструктурной модели знаний о полёте (ситуационное дерево, окно безопасности, динамическое окно безопасности, диаграмма изменения структуры шансов безопасности и др.) позволяют строить оперативный физико-логический прогноз развития динамичной многофакторной ситуации. При этом учитывается представительное множество альтернативных («родственных») сценариев, ключевых эксплуатационных факторов влияния, близость и взаимозависимость лётно-эксплуатационных ограничений.

Разработанные графоаналитические формы, продемонстрированные в примерах на рис. 4-7, 13, 24, 32, 33, целесообразно использовать для прототипирования сред виртуальной реальности с высоким уровнем обобщения знаний о полёте применительно к перспективным системам интерфейса «человек-оператор – ЛА», в том числе для управления полётом группы беспилотных ЛА «стайного» применения [8].

5. Заключение

В статье представлен обобщенный метод обеспечения «встроенной» безопасности полёта ЛА в сложных (многофакторных) условиях вблизи и за пределами допустимого диапазона лётной эксплуатации. Метод доведен до уровня технологии в виде программно-моделирующего комплекса анализа и оценки безопасности полёта VATES. Комплекс используется в качестве виртуального лётно-испытательного стенда для изучения и прогнозирования поведения системы «оператор (лётчик, автомат) – летательный аппарат – эксплуатационная среда» в потенциально опасных многофакторных ситуациях.

Для решения задач обеспечения «встроенной» безопасности полёта ЛА необходимо иметь следующую исходную информацию:

- «параметрическое определение» ЛА (базу данных аэродинамических, массо-инерционных, газодинамических и других характеристик объекта);
- результаты макроструктурного ситуационного моделирования полёта;
- данные наблюдения эволюции состояния системы относительно лётно-эксплуатационных ограничений в полёте.

Достоинства метода следующие:

- обобщенный характер алгоритмов и структур данных;
- учет свойств «топологии» безопасности ЛА;
- физико-логический прогноз полёта;
- применение ситуационных деревьев в качестве «базы знаний»;
- анализ «окрестностей» многофакторной ситуации при принятии решений;
- простота вычислений;
- компактность программной реализации.

Необходимым условием для бортовых приложений разработанного метода является наличие мультимодальных датчиков, способных обнаруживать потенциально опасные физические и виртуальные объекты (препятствия) внутри локальной окрестности («эллипсоида/конуса безопасности») ЛА в реальном масштабе времени. Второе необходимое условие – это наличие достоверной базы

данных «параметрического определения» ЛА, полученной для заданной области допустимых и предельных режимов полёта и условий эксплуатации.

Метод целесообразно использовать в проектах разработки интеллектуальных систем управления и «встроенной» безопасности полёта для беспилотных и пилотируемых ЛА различного назначения, при сопровождении лётных испытаний, расследовании катастроф и инцидентов. Метод может быть полезен при разработке способов распознавания, предотвращения и безопасного разрешения различных нештатных ситуаций и условий полёта: потеря управления, необычное угловое положение ЛА, полёт вблизи рельефа местности, ошибка лётчика, отказы бортовых систем, неблагоприятные погодные условия, полёт в стесненном воздушном пространстве, спутный след, опасное сближение ЛА в воздухе, «9/11» и др.

Конечная цель внедрения метода состоит в том, чтобы способствовать созданию эффективных и недорогих технических средств обучения (для лётчиков, операторов, инструкторов, испытателей), информационно-моделирующих комплексов для сопровождения процессов разработки, испытаний и применения авиационной техники, автономных интеллектуальных систем безопасности полёта перспективных беспилотных и пилотируемых ЛА, предназначенных для сложных и неизвестных условий применения.

Список литературы

1. Бурдун И.Е. Изучение физики и логики сложных полётных ситуаций с помощью программно-моделирующего комплекса VATES // Тренажерные технологии и обучение: новые подходы и задачи, 24-25 апреля 2003 года. Жуковский: ЦАГИ, 2003. 11 с.
2. Burdun I.Y. The Intelligent Situational Awareness And Forecasting Environment (The S.A.F.E. Concept): A Case Study (Paper 981223) // Proc. of 1998 Advances in Flight Safety Conference and Exhibition, April 6-8, 1998, Daytona Beach, FL (P-321). SAE. 1998. P. 131-144.
3. Burdun I.Y., Parfentyev O.M. Fuzzy Situational Tree-Networks for Intelligent Flight Support // Int. Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence. Vol. 12. 1999. P. 523-541.
4. Бурдун И.Е. Прогнозирование свойств безопасности полёта летательного аппарата в сложных ситуациях на основе результатов аэродинамических исследований и ситуационного моделирования // Сб. трудов Юбилейной научно-технической конференции, посвященной 60-летию образования отделений аэродинамики летательных аппаратов и прочности авиационных конструкций СибНИА, 15-17 июня 2004 года. Новосибирск: СибНИА, 2005. С. 45-57.
5. Программно-моделирующий комплекс (ПМК) для исследований безопасности поведения системы «оператор (лётчик, автомат) – летательный аппарат (ЛА) – эксплуатационная среда» в сложных (многофакторных) полётных ситуациях (ПМК VATES) // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007613256, выданное Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ. Правообладатель: ООО «ИНТЕЛЮНИКА». Автор: Бурдун И.Е. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02.08.2007. М. 2007. 1 с.
6. Бурдун Е.И. Прогнозирование безопасности полёта самолета гражданской авиации в сложных условиях. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора инженерных наук. Рига: РТУ, 2008. 36 с.
7. Burdun I.Y. UAV 'Built-in' Safety Protection: A Knowledge-Centered Approach // Unmanned Systems Europe 2007 Conference & Exhibition, 8-9 May 2007, Hilton Cologne, Köln, Germany, AUUSI: 2007. 49 pp.
8. Бурдун И.Е. Модель самоорганизации движения К. Рейнольдса и вопросы «стадного» применения высокоманевренных высокоавтономных беспилотных ЛА // Материалы XVI Школы-семинара ЦАГИ Аэродинамика летательных аппаратов, 3-4 марта 2005 года, пос. им. Володарского. Жуковский: ЦАГИ, 2005. С. 28-29.