

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЁТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
В СЛОЖНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И СИТУАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ¹²

И.Е. Бурдун

СибНИА, Новосибирск

ВВЕДЕНИЕ

Как правило, сложная ситуация в полёте формируется в результате неблагоприятного стечения обстоятельств – перекрёстного влияния комплекса эксплуатационных факторов. Это могут быть ошибки и вариации управления лётчика, механические отказы и информационно-логические ошибки в работе бортовых систем, плохие погодные условия, вариации центровки и конфигурации ЛА, отклонения от штатного сценария полёта. Пробелы в системе знаний специалиста – аэродинамика, динамика, конструктора, лётчика, эксперта – о сценариях многофакторных ситуаций повышают риск спонтанного развития катастроф типа «цепная реакция» [1]. Изучение таких ситуаций в лётных испытаниях, на пилотажных стендах, математических моделях затруднено ввиду комбинаторных, технических, финансовых и других ограничений.

Разработан метод прогнозирования свойств безопасности полёта ЛА в многофакторных ситуациях, дополняющий традиционный инструментальный исследований полёта. В подходе используются следующие методы и средства: аэродинамика и динамика полёта ЛА, ситуационное управление, численные методы, вычислительный эксперимент, элементы искусственного интеллекта, теория графов, компьютерная графика, динамические структуры данных, язык Фортран, авторский программно-моделирующий комплекс (ПМК) анализа и оценки безопасности полёта ЛА VATES (v.7) [2], ПЭВМ Р-IV, система MS Windows, программы MS Office, Pfc, MAGE.

Метод позволяет планировать и воспроизводить на ЭВМ представительное множество сценариев многофакторных полётных ситуаций, изучать их свойства безопасности, используя обобщённые графоаналитические формы и критерии оценки. В статье даётся введение в новый метод на примере решения задачи прогнозирования безопасности взлёта гипотетического пассажирского самолёта в сложных условиях.

СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ

Основу метода образует автономная ситуационная модель поведения системы «оператор (лётчик, автомат) – ЛА – эксплуатационная среда», реализованная в ПМК VATES. В системную модель входят [2]: нелинейная математическая модель аэродинамики и динамики полёта ЛА, модели тактики оператора, воздействий эксплуатационной среды, полётной ситуации, а также средства планирования и отображения полёта, анализа и оценки результатов моделирования по критериям безопасности.

ПМК VATES позволяет проводить вычислительный эксперимент («полёт») на системной модели в ускоренном (в 20...100 раз) масштабе времени, без участия лётчика и применения специального оборудования. При этом решаются две задачи [5, 6]: (а) моделирование представительного множества сценариев реалистичных ситуаций для заданной многофакторной области режимов и условий полёта и (б) построение обобщённой картины прогноза безопасности полёта ЛА для этих ситуаций.

Таким образом, модель выступает в качестве генератора виртуального «налёта» ЛА (проекта) в потенциально опасных многофакторных условиях полёта. Надёжность прогноза безопасности зависит от уровня достоверности и полноты «параметрического определения» ЛА [4...7].

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЁТА

Состояние системы в каждый момент времени полёта t , регистрируемый в вычислительном эксперименте с системной моделью, измеряется вектором значений переменных $\{x_1, \dots, x_i, \dots, x_{N(x)}\}$:

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

где $N(\mathbf{x})$ – размерность вектора, $N(\mathbf{x}) = 300 \dots 500$ – в зависимости от сложности модели и задачи исследования.

Поведение системы на отрезке времени существования ситуации $[t^*, t^*]$ можно описать последовательным набором записей вида (1). Этот набор формируется с шагом Δ по времени и называется «полётom» F_k :

$$F_k = \{ \{x_1(t^*), \dots, x_{N(x)}(t^*)\}, \{x_1(t^* + \Delta), \dots, x_{N(x)}(t^* + \Delta)\}, \dots, \{x_1(t^* + (n-1)\Delta), \dots, x_{N(x)}(t^* + (n-1)\Delta)\} \}, \quad (2)$$

где k – код «полёта» (ситуации), n – количество записей в F_k , $t^* = t^* + (n-1)\Delta$, $\Delta = 0,025 \dots 0,5$ с.

¹ © 2004 год, Бурдун И.Е.

² Бурдун И.Е. Прогнозирование свойств безопасности полёта летательного аппарата в сложных ситуациях на основе результатов аэродинамических исследований и ситуационного моделирования, В сб. докладов "Юбилейная научно-техническая конференция, посвящённая 60-летию образования отделений аэродинамики летательных аппаратов и прочности авиационных конструкций СибНИА, 15-17 июня 2004 года", СибНИА, Новосибирск, Россия, 2004, 14 с.

СОБЫТИЯ И ПРОЦЕССЫ

Наборы вида (2) служат основой для изучения свойств безопасности полёта ЛА на двух уровнях [1, 4]. Это «микроструктура» полёта (нижний уровень) и «макроструктура» полёта (верхний уровень).

Связь между двумя уровнями ситуационной модели, реализованная в ПМК VATES, показана на рисунке 1.

Основу «микроструктурной» модели полёта образуют события и процессы. Эти формальные объекты представляют, соответственно, дискретные и непрерывные компоненты модели полётной ситуации [1].

Событие полёта E задает характерное состояние системы, которое представляет важность для специалиста с позиций существенного изменения физики или логики анализируемой ситуации.

В ходе вычислительного эксперимента каждое событие из календаря возможных событий $\Omega(E)$ может находиться в одном из четырёх состояний: «не распознано» (NR), «только что распознано» (R), «заморожено» (F) или «давно распознано» (P), то есть:

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

События из $\Omega(E)$ моделируются с помощью формального автомата перехода, имеющего состояния NR, R, F и P. Соответственно, внутренние границы множества (3) могут изменяться в течение ситуации.

Процесс полёта Π описывает характерный длительный аспект поведения одной из трёх 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 вышеуказанных видов образует список $\Omega(\Pi)$:

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

С каждым процессом Π в модели связаны два события: начальное E_* (открывает процесс в эксперименте) и, возможно, конечное E^* (закрывает процесс). Тогда тройка $s = (E_*, \Pi, E^*)$ образует элементарную ситуацию, где $E_* \in \Omega(E)$, $E^* \in \Omega(E)$, $\Pi \in \Omega(\Pi)$. Подобно событиям, процессы из $\Omega(\Pi)$ моделируются с помощью автомата перехода с четырьмя состояниями: «не открыто» (NO), «открыто» (O), «заморожено» (F) и «закрыто» (C).

СЦЕНАРИЙ СИТУАЦИИ

Группа событий и процессов, связанных отношениями s , образует сценарий ситуации S [7]. Сценарий – это план, который задаёт содержание и логику ситуации: причинные, инструментальные, временные и другие отношения, определяющие поведение системы. Сценарий S удобно представить в виде ориентированного графа:

$$S = \Omega(E) \cup \Omega(\Pi). \quad (5)$$

В графе (5) вершины – это события из $\Omega(E)$, а ориентированные дуги – процессы из $\Omega(\Pi)$. Сценарий любой ситуации можно реализовать в вычислительном эксперименте при помощи следующего алгоритма [2]:

$$(\forall S) (S = \Omega(E) \cup \Omega(\Pi)) (\exists s) (s = (E_i, \Pi_j, E_k) (E_i, E_k \in \Omega(E) \wedge \Pi_j \in \Omega(\Pi)) ((\forall t) (t \in [t^*, t^*]) ((E_i \in \Omega^P(E) \wedge E_k \notin \Omega^P(E) \wedge \Pi_j \notin \Omega^C(\Pi)) \Rightarrow \Pi_j \in \Omega^A(\Pi)) \vee ((E_k \in \Omega^P(E) \Rightarrow \Pi_j \in \Omega^C(\Pi))), \quad (6)$$

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

Опыт применения системной модели для 22 типов/проектов ЛА и более 500 типов ситуаций показывает, что концепция сценария (5) и алгоритм (6) достаточно универсальны. Это позволяет изучать полётные ситуации практически любого уровня сложности для большинства этапов движения, задач применения и типов ЛА.

В Руководствах по лётной эксплуатации ЛА, алгоритмах систем автоматического управления, программах лётных испытаний, программах обучения лётчиков представлены сценарии для весьма ограниченного набора ситуаций. Это базовые (штатные и нештатные) полётные случаи, которые, по мнению экспертов, могут встретиться в будущей эксплуатации ЛА.

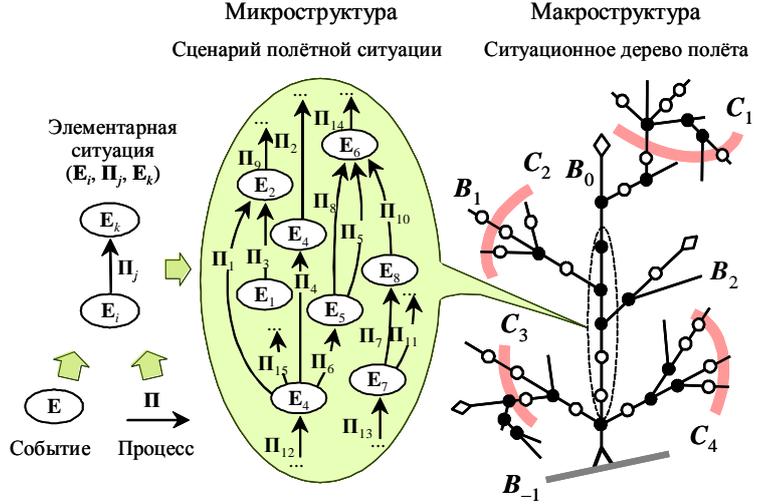


Рисунок 1. Микро- и макроструктурный уровни ситуационной модели полёта.

В базовых сценариях, как правило, задаётся влияние от одного до трёх 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.

С целью демонстрации метода разработаны пять базовых сценариев этапа взлёта самолёта (рисунок 2):

$$\{S_1, \dots, S_5\}, \quad (7)$$

где S_1 – «Взлёт нормальный, выдерживание целевых (заданных) углов наклона траектории и крена в наборе высоты», S_2 – «Взлёт нормальный в условиях бокового ветра и ВПП заданного состояния, с выдерживанием целевых углов наклона траектории и крена в наборе высоты», S_3 – «Взлёт продолженный (отказ левого двигателя на скорости V_{EF}), с выдерживанием целевых углов наклона траектории и крена в наборе высоты», S_4 – «Взлёт нормальный в условиях сдвига ветра, с выдерживанием целевых углов наклона траектории и крена в наборе высоты», S_5 – «Взлёт продолженный (отказ левого двигателя на скорости V_{EF}) с боковым ветром и выдерживанием целевых углов наклона траектории и крена в наборе высоты».

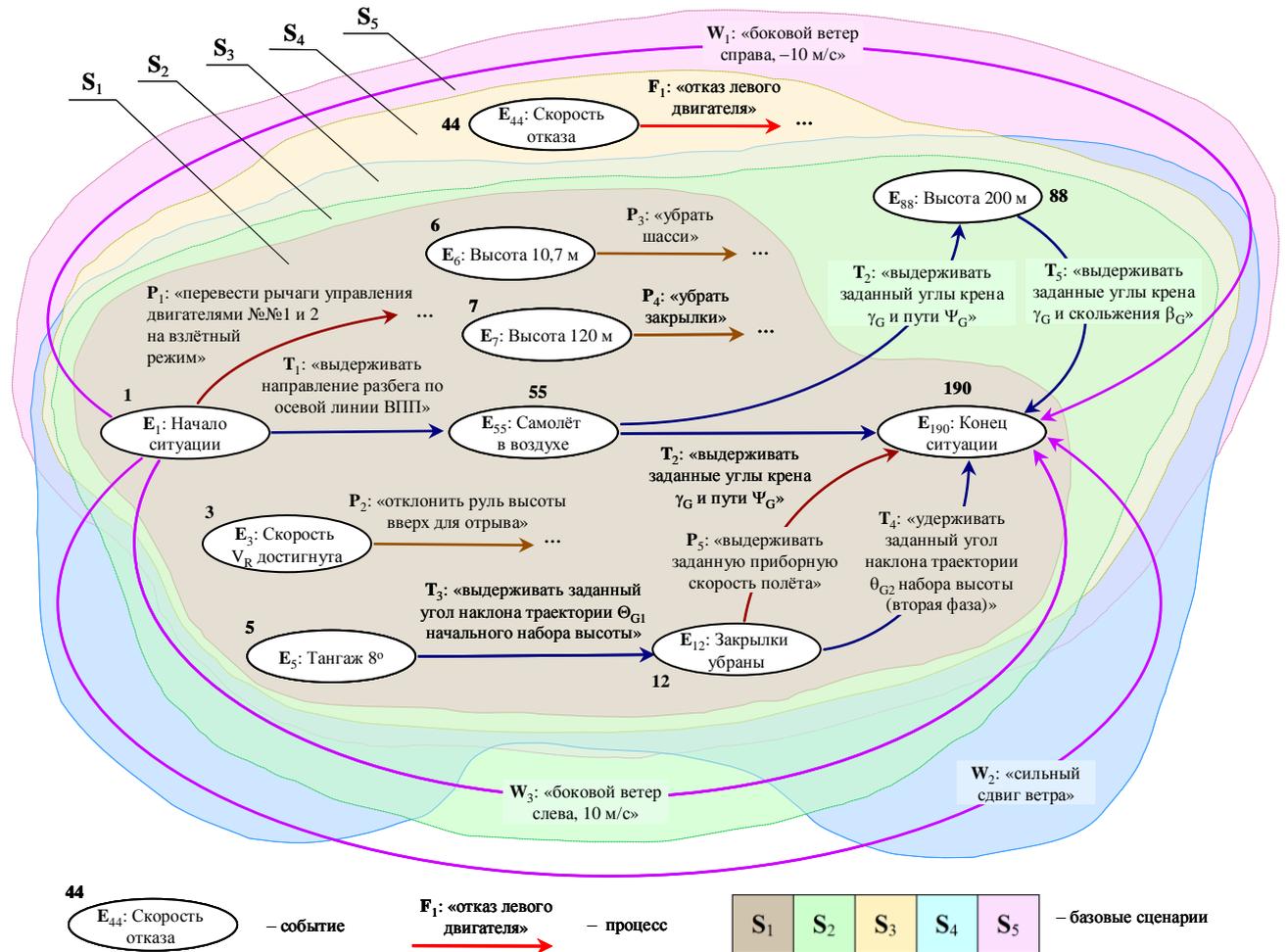


Рисунок 2. Объединённый граф базовых сценариев взлёта.

Из рисунка 2 видно, что графы S_1, \dots, S_5 компактны, близки по структуре, но при этом представляют разные ситуации. Сценарии вида (5) легко уточнять и дополнять: для этого достаточно изменить состояние или параметры событий $\Omega(E)$ и процессов $\Omega(\Pi)$. Таким образом, концепция сценария позволяет описывать ситуации различного содержания и уровня сложности с использованием объектов двух типов: «событие» и «процесс».

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ

В системной модели эксплуатационный фактор Φ определяется как переменная $x_i, x_i \in \mathbf{x}$, которая в течение ситуации может варьироваться – существенно и независимо, тем самым оказывая влияние на безопасность полёта. Это влияние может быть как негативным, так и позитивным. Эксплуатационные факторы используются в вычислительном эксперименте для получения нестандартных полётных случаев – вариаций базовых ситуаций (5). Каждому такому «полёту» соответствует определённое сочетание и значения факторов Φ_j , которые вводятся в базовый сценарий по специальному правилу.

Источниками информации для формализации эксплуатационных факторов в модели являются: статистика и материалы расследования авиационных катастроф и инцидентов, данные лётной эксплуатации, исследования

по отказобезопасности подсистем ЛА, Руководства по лётной эксплуатации, программы лётных испытаний, программы обучения лётчиков, нормы лётной годности (АП, FAR, JAR) и др.

Пример описания подмножества эксплуатационных факторов $\{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_5, \Phi_7, \Phi_9, \Phi_{11}, \Phi_{12}, \Phi_{13}\}$ для этапа взлёта пассажирского самолёта представлен в таблице 1.

Таблица 1. Примеры эксплуатационных факторов (взлёт)

Φ_i	Наименование	x_i	Испытываемые значения, $\Omega(\Phi_i)$
Φ_1	Продольная центровка, %	\bar{x}_{CG}	{23,5; 24,5; ...; 28,5}
Φ_2	Скорость подъёма носовой стойки шасси, км/ч	V_R	{150; 160; ...; 250}
Φ_3	Отклонение руля высоты на отрыв	$\Delta\delta_e$	{-15°; -14°; ...; -5°}
Φ_5	Скорость бокового ветра, м/с	W_{vg}	{-20; -15; ...; 20}
Φ_7	Целевой угол наклона траектории начального набора высоты	θ_{GI}	{2°; 4°; ...; 20°}
Φ_9	Интенсивность сдвига ветра, -	k_W	{1 («сильный сдвиг»); 1,2; ...; 2 («ураган»)}
Φ_{11}	Целевой угол крена	γ_G	{-45°; -37,5°; ...; 45°}
Φ_{12}	Скорость ввода отказа двигателя, км/ч	V_{EF}	{100; 115; ...; 205}
Φ_{13}	Отказ левого двигателя на скорости V_{EF} , -	ζ_{LHE}	{0; 1}

Из таблицы 1 и рисунка 2 видно, что эксплуатационные факторы – это параметры изменённых или новых событий и/или процессов полёта. Например, фактор Φ_2 влияет на критерий распознавания события E_3 .

НЕЧЁТКОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ

Очевидно, что для обеспечения безопасности полёта ЛА ключевые системные переменные должны контролироваться в полёте и их допустимые значения могут быть ограничены. Для этих целей в системной модели используется понятие «нечёткого ограничения» [7], впервые введённое Л. Заде.

Ввиду высокого уровня сложности системы практическая граница между опасными и безопасными значениями переменных x_i , $x_i \in X$, как правило, точно не известна – «размыта». То есть, переход от полностью неприемлемого значения переменной x_i к полностью приемлемому значению происходит не скачком, а постепенно. В многофакторных ситуациях полёта такая неопределённость может быть внутренним свойством реальной системы или процесса проектирования ЛА, то есть иметь существенно нестатистическую природу. Соответственно, в 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 $[x_{i \min}; a)$, $[a; b)$, $[b; c]$, $(c; d]$ и $(d; x_{i \max}]$, на которые нечёткое ограничение C разбивает область определения переменной x_i , можно задать следующим образом:

$$\begin{aligned} [x_{i \min}; a): x_i(t) \in [x_{i \min}; a) \Rightarrow \mu_C(x_i) = 0; [a; b): x_i(t) \in [a; b) \Rightarrow \mu_C(x_i) \in (0; 1); [b; c]: x_i(t) \in [b; c] \\ \Rightarrow \mu_C(x_i) = 1; (c; d]: x_i(t) \in (c; d] \Rightarrow \mu_C(x_i) \in (0; 1); (d; x_{i \max}]: x_i(t) \in (d; x_{i \max}] \Rightarrow \mu_C(x_i) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Примеры описания нечётких ограничений в виде (8) для трёх переменных (α , V_{zg} , β) даны в таблице 2.

Таблица 2. Примеры нечётких ограничений (взлёт)

x_i	Граничные события участка действия ограничения переменной		Характерные точки числового носителя нечёткого множества-ограничения				Единица измерения
	E_*	E^*	a	b	c	d	
α	E_1	E_{12}	-2,5	0	10	20	град
	E_{12}	E_{190}	-2,5	0	8	13	град
V_{zg}	E_{55}	E_{190}	-7	-4,5	15	20	м/с
β	E_1	E_{190}	-15	-10	10	15	град

Примечания. См. рисунок 2. Обозначения переменных: α – угол атаки; V_{zg} – вертикальная скорость; β – угол скольжения.

ПАЛИТРА БЕЗОПАСНОСТИ

Цвет – это естественный и весьма эффективный носитель информации о состоянии безопасности сложной динамической системы. С целью качественной оценки текущего уровня безопасности полёта ЛА для каждой ключевой переменной x_i , $x_i \in X$, определим палитру безопасности π , включающую шесть основных цветов:

$$\pi = \{\xi_W, \xi_T, \xi_G, \xi_Y, \xi_R, \xi_B, \dots\}. \quad (9)$$

В палитре (9) имеем (см. также рисунок 3а):

- ξ_W – «белый» или «серый» цвет; 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 – «зелёный» 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 по переменной x_i ;
- ξ_Y – «жёлтый» 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 специалиста 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 специалиста 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*). Соответственно, для цветов безопасности из π можно построить отношение порядка (см. также рисунок 3b):

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

В неравенстве (10) отношение $\xi_l < \xi_m$ означает, что цвет ξ_m , стоящий справа, «горячее», то есть более опасен, чем цвет ξ_l , стоящий слева; $l, m \in \{W, T, G, Y, R, B\}$. Отношение $\xi_W < \xi_T$ основано на «мягком» допущении.

ПРАВИЛО РАСКРАШИВАНИЯ ОБЛАСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ

Пусть определены вышеперечисленные и, возможно, другие цвета безопасности $\xi_k, k \in \{W, T, G, Y, R, B, \dots\}$, палитра (9) и отношение (10). Пусть также известен результат измерения состояния системы (1) в момент времени t . Тогда для каждой контролируемой системной переменной $x_i, x_i \in \mathbf{x}$, можно формализовать правило раскрашивания характерных зон (8) её области определения в цвета безопасности (см. также рисунок 3c):

$$\begin{aligned} x_i(t) \in [x_{i \min}; x_{i f1}] \vee x_i(t) \in (x_{i f2}; x_{i \max}] &\Rightarrow \xi(x_i(t)) = \xi_B \wedge \text{состояние типа «катастрофа»}, \\ x_i(t) \in [x_{i f1}; a) \vee x_i(t) \in (d; x_{i f2}] &\Rightarrow \xi(x_i(t)) = \xi_R \wedge \text{состояние типа «опасность»}, \\ x_i(t) \in [a; b) \vee x_i(t) \in (c; d] &\Rightarrow \xi(x_i(t)) = \xi_Y \wedge \text{состояние типа «внимание»}, \\ x_i(t) \in [b; c] &\Rightarrow \xi(x_i(t)) = \xi_G \wedge \text{состояние типа «норма»}, \\ x_i(t) \in [x_{i \text{opt1}}; x_{i \text{opt2}}] &\Rightarrow \xi(x_i(t)) = \xi_T \wedge \text{состояние типа «оптимум»}, \\ x_i(t) \in \emptyset &\Rightarrow \xi(x_i(t)) = \xi_W \wedge \text{состояние типа «неопределённость»}. \end{aligned} \quad (11)$$

Правило (11) связывает палитру безопасности (9) с характерными зонами нечётких ограничений (8). В гражданских приложениях метода это правило должно отражать требования норм лётной годности ЛА и представления экспертов о допустимых, граничных и недопустимых состояниях системы. Крайние зоны области определения переменной $x_i, [x_{i \min}; x_{i f1}]$ и $(x_{i f2}; x_{i \max}]$, если заданы, могут определять катастрофические состояния системы по x_i , где $x_{i f1}$ и $x_{i f2}$ – границы зон начала необратимых изменений в состоянии системы, $x_i \in \mathbf{x}$. Отношение $x_i(t) \in \emptyset$ означает, что значения $x_i(t)$ неизвестны, то есть переменная x_i не регистрируется в наборе (2).

СПЕКТРЫ БЕЗОПАСНОСТИ

С целью визуального, качественного анализа динамики изменения уровня (состояния) безопасности полёта, характеризуемого палитрой π , введём понятия частного и интегрального спектров безопасности ситуации.

Частный спектр безопасности Σ_i [7] – это 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 (11) на основании данных из набора (2):

$$\Sigma_i = \xi(x_i(t^*)) \parallel \xi(x_i(t^* + \Delta)) \parallel \xi(x_i(t^* + 2 \cdot \Delta)) \parallel \dots \parallel \xi(x_i(t^* + (n - 1) \cdot \Delta)), \quad (12)$$

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 (11) устанавливают соответствие между текущим значением $x_i(t)$ и цветом $\xi(x_i(t))$ из палитры $\pi, t \in [t(\mathbf{E}^*); t(\mathbf{E}^*)]$, где \mathbf{E}^* – начальное событие и \mathbf{E}^* – конечное событие ситуации. Например, если для некоторого «полёта» F_k согласно (11) 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:

$$\begin{aligned} \xi(x_i(t^*)) = \xi_W, \xi(x_i(t^* + \Delta)) = \xi_W, \xi(x_i(t^* + 2 \cdot \Delta)) = \xi_G, \xi(x_i(t^* + 3 \cdot \Delta)) = \xi_Y, \xi(x_i(t^* + 4 \cdot \Delta)) = \xi_R, \xi(x_i(t^* + 5 \cdot \Delta)) = \xi_Y, \\ \xi(x_i(t^* + 6 \cdot \Delta)) = \xi_Y, \xi(x_i(t^* + 7 \cdot \Delta)) = \xi_G, \dots, \xi(x_i(t^* + (n - 2) \cdot \Delta)) = \xi_G, \xi(x_i(t^* + (n - 1) \cdot \Delta)) = \xi_G, \end{aligned} \quad (13)$$

то частный спектр безопасности на отрезке времени от t^* до $t^* + (n - 1) \cdot \Delta$ будет иметь вид (см. рисунок 3d):

$$\Sigma_i = \xi_W \parallel \xi_W \parallel \xi_G \parallel \xi_Y \parallel \xi_R \parallel \xi_Y \parallel \xi_Y \parallel \xi_G \parallel \dots \parallel \xi_G \parallel \xi_G. \quad (14)$$

Измерив текущие уровни безопасности по t для всех контролируемых переменных $x_i, i = 1, \dots, p, t \in [t^*; t^*]$, получим семейство частных спектров безопасности вида (12), построенных на единой шкале времени:

$$\{\Sigma_i, \dots, \Sigma_p\}. \quad (15)$$

На основе набора вида (15) можно сформировать единый цветовой образ, характеризующий безопасность полётной ситуации – «интегральный спектр безопасности». Интегральный спектр Σ [7] – это отображение $F_k \rightarrow \pi$, которое визуально характеризует изменение уровня безопасности ситуации в целом, с учётом значений всех контролируемых системных переменных $x_i, x_i \in \{x_1, \dots, x_p\}$. Другими словами, спектр Σ есть обобщённая цветографическая картина изменения уровня безопасности полёта на отрезке времени существования ситуации $[t^*; t^*]$. Интегральный спектр безопасности Σ строится согласно следующему обобщённому алгоритму [7]:

$$(\forall t) (t \in [t^*; t^*]) (\exists \xi(x_i(t)) (x_i \in \{x_1, \dots, x_p\}) (\xi(x_i(t)) \in \{\xi_w, \xi_T, \xi_G, \xi_A, \xi_R, \xi_B, \dots\} \wedge (\xi_B < \xi_R < \xi_Y < \xi_G < \xi_T < \xi_w)) (\xi(t) = \max \xi(x_i(t)), i = 1, \dots, p) \Rightarrow (\xi(t) \in \Sigma \wedge \Sigma = \xi(t^*) \parallel \xi(t^* + \Delta) \parallel \dots \parallel \xi(t^*)), \quad (16)$$

где p – количество контролируемых системных переменных x_i – частных спектров Σ_i .

Из отношения (16) следует, что в интегральном спектре Σ фиксируются только наиболее опасные нарушения ограничений $C(x_i)$, допущенные по всем ключевым системным переменным x_1, \dots, x_p в течение ситуации.

Суть алгоритма (16) состоит в следующем. Для каждого регистрируемого момента времени полёта t в интегральный спектр Σ заносится штрих-код, имеющий цвет самого «горячего» цвета из всех цветов безопасности, зафиксированных на данный момент в частных спектрах Σ_i из набора (15). Например (см. рисунок 3e), для условий $p = 5, \xi(x_1(t)) = \xi_G, \xi(x_2(t)) = \xi_R, \xi(x_3(t)) = \xi_w, \xi(x_4(t)) = \xi_G, \xi(x_5(t)) = \xi_Y$ в интегральном спектре Σ получим: $\xi(t) = \xi_R$. 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 : $\xi(t) \equiv \xi(x_2(t))$.

Примеры построения и анализа спектров безопасности полёта ЛА приводятся в работах [1...7].

КАТЕГОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЁТА

В нормативных документах по лётной годности ЛА вводятся четыре класса особых полётных ситуаций: «усложнение условий полёта», «сложная ситуация», «аварийная ситуация» и «катастрофическая ситуация». Класс особой ситуации определяется оценкой степени опасности её последствий, влиянием ситуации на рабочую нагрузку экипажа и лётные характеристики ЛА. То есть, определения особых ситуаций не отражают в явном виде связь между уровнем опасности ситуации и физико-логическим механизмом её развития.

Для измерения уровня безопасности многофакторных полётных ситуаций с учётом истории развития ситуации введём «шкалу безопасности», включающую пять классификационных категорий **I**, ..., **V**: категория **I** – безопасные ситуации (подмножество-кластер K^I); категория **II** – условно-безопасные ситуации (подмножества K^{II-a} и K^{II-b}); категория **III** – потенциально опасные ситуации (подмножество K^{III}); категория **IV** – опасные или запрещённые ситуации (подмножество K^{IV}); категория **V** – катастрофические ситуации типа «цепная реакция» (подмножество K^V). В таблице 3 даны определения вышеперечисленных категорий и обобщённые критерии классификации ситуаций на основе анализа преобладающей окраски и структуры их интегральных спектров.

Из таблицы 3 видно, что каждой категории безопасности поставлен в соответствие уникальный числовой код i и цвет $\xi^i: i \in \{I, \dots, V\}, \xi^i \in \{\xi^I, \dots, \xi^V\}$, где $\xi^I \equiv \xi_G, \xi^{II-b} \equiv \xi_Y, \xi^{IV} \equiv \xi_R, \xi^V \equiv \xi_B$ (см. определение палитры (9) и рисунок 3a); ξ^{II-a} и ξ^{III} – промежуточные цвета «салатовый» и «оранжевый». Существенно, что при отнесении ситуации к той или иной категории безопасности учитываются физика и логика полёта, суммарная длительность и расположение во времени участков преобладающих цветов ξ_G, ξ_Y, ξ_R и ξ_B в спектре Σ .

Таким образом, определения и критерии классификации, введённые в таблице 3, позволяют разбить любое заданное множество «полётов» (ситуаций) на шесть непересекающихся подмножеств-кластеров:

$$\{K^I, K^{II-a}, K^{II-b}, K^{III}, K^{IV}, K^V\}. \quad (17)$$

Разбиения вида (17) можно получать автоматически, если заданы формальные определения нечётких понятий «кратковременное», «временное» и «длительное». Представляется, что принцип классификации многофакторных полётных ситуаций по категориям безопасности **I**, ..., **V** на основе характеристик времени – универсальной, независимой переменной – является наиболее общим.

СИТУАЦИОННОЕ ДЕРЕВО

Глубинную причину авиационных катастроф и инцидентов можно определить как не устранённое 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 полёте. В качестве генератора таких ситуаций используется ПМК VATES.

Результаты макроструктурного моделирования удобно представить в виде ситуационного дерева [1, 7] – см. рисунок 1. Ситуационное дерево **T** – это объединение родственных ситуаций (траекторий, «полётов» F_{ik}), полученных как вариации заданного базового сценария S_0 в результате влияния эксплуатационных факторов:

$$\mathbf{T} = \{F_{i1}, \dots, F_{ik}, \dots, F_{iN(\mathbf{T})}\}, \quad (18)$$

где $N(\mathbf{T})$ – общее количество «полётов» в \mathbf{T} , $N(\mathbf{T}) = i_{N(\mathbf{T})} - i_1 + 1$, i_k – код «полёта», $k = 1, \dots, N(\mathbf{T})$. Таким образом, развитие каждой ситуации-ветви B_k («полёта» F_{ik}) в дереве \mathbf{T} определяется набором и значениями (силой) действующих в ней факторов Φ_j , базовым сценарием S_0 и динамикой системы, $k = 1, \dots, N(\mathbf{T})$. Ситуационное дерево изображают в проекции на плоскость или в пространстве [4, 5, 7]. Его координатные оси x_m , $x_m \in \mathbf{x}$, выбирают, исходя из удобства анализа заданного множества ситуаций и эксплуатационных факторов.

Определим структурные элементы ситуационного дерева (см. рисунок 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» O . «Корень» дерева \mathbf{T} (поддерева T_n) Δ есть первое состояние типа «почка» на родительской ветви B_{-1} (ветви B_{n-1}).

Сложность 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 \mathbf{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_i (см. рисунок 1), что чревато инцидентом или катастрофой. И наоборот: введение определённых корректирующих факторов Φ_j в сложный сценарий может способствовать восстановлению безопасного режима движения.

Для подмножеств-кластеров ситуаций, образующих дерево \mathbf{T} и полученных согласно критериям из таблицы 3, распределение шансов безопасности $\{\chi^I, \chi^{II-a}, \chi^{II-b}, \chi^{III}, \chi^{IV}, \chi^V\}$ вычисляется согласно алгоритму:

$$(\forall j) (j = I, II-a, II-b, III, IV, V) (n^j = 0) (\forall F_k) (F_k \in \{F_1, \dots, F_k, \dots, F_{N(\mathbf{T})}\} \wedge N(\mathbf{T}) \neq 0) \\ (F_k \in K^j \Rightarrow n^j = n^j + 1) \wedge (\chi^j = \frac{n^j}{N(\mathbf{T})} \cdot 100, \sum_{j=I}^V \chi^j = 100\%), \quad (19)$$

где n^j – счётчик ситуаций в кластере K^j . Таким образом, концепция ситуационного дерева позволяет не только строить множества родственных ситуаций с заданными свойствами, но и количественно оценивать влияние различных эксплуатационных факторов на безопасность полёта. Для анализа физики и логики развития ситуаций могут дополнительно использоваться события из $\Omega(E)$ в привязке к ветвям дерева \mathbf{T} .

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ГИПОТЕЗА

Влияние одиночных эксплуатационных факторов на динамику и безопасность полёта ЛА, как правило, хорошо поддаётся изучению. Гораздо труднее воспроизвести и оценить эффект влияния комплекса таких факторов. Метод позволяет задавать правила изменения базового сценария с целью введения в него новых наборов эксплуатационных факторов и автоматической генерации ситуационного дерева с заданными свойствами. Такое правило называется эксплуатационной гипотезой Γ [1, 4] и может быть описано правилом (формулой) вида:

$$\Gamma = \prod_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^m \Phi_k^i \right], \quad (20)$$

где Φ_k^i – это k -тый зависимый фактор на i -том независимом уровне ветвления дерева \mathbf{T} , $i = 1, \dots, n$, $k = 1, \dots, m$; Π – операция Декартова произведения; Σ – операция зависимого комбинирования значений Φ_k^i на i -том уровне.

Формула (20) определяет, какой комплекс факторов $\{\Phi_{j(1)}, \dots, \Phi_{j(n(\Phi))}\}$ и каким образом будет взаимодействовать в каждой производной ситуации из \mathbf{T} . Композиция базового сценария S и эксплуатационной гипотезы Γ , $S \cdot \Gamma$, порождает множество производных (окрестных, родственных) ситуаций $\Omega(F)$, где $\Omega(F) \equiv \mathbf{T}$.

Для демонстрации правила (20) на рисунке 4 представлен полный набор гипотез $\{\Gamma_1, \dots, \Gamma_{13}\}$, испытанных в базовых сценариях (7). Примеры формализации четырёх гипотез $\{\Gamma_1, \Gamma_{10}, \Gamma_{11}, \Gamma_{12}\}$ из списка $\{\Gamma_1, \dots, \Gamma_{13}\}$ при помощи правила (20) показаны в таблице 4. Там же показана статистика соответствующих серий «полётов».

Таблица 4. Примеры эксплуатационных гипотез и статистика вычислительного эксперимента (взлёт)

S_i	Эксплуатационная гипотеза			$N(\Omega_k(F))$	Δt , с	$T S_i \cdot \Gamma_k$, ч
	Γ_k	Формула	$n(\Phi)$			
S_1	Γ_1	$\bar{x}_{CG} \times (V_R + \Delta \delta_e)$	3	66	90	1,65
S_5	Γ_{10}	$\zeta_{LHE} \times V_{EF} \times W_{vg}$	3	104	120	3,467
S_1	Γ_{11}	$\theta_{G1} \times \gamma_G$	2	130	60	2,167
S_4	Γ_{12}	$k_W \times \theta_{G1} \times \gamma_G (k_W = 1)$	3	130	60	2,167

Примечания: Δt – длительность ситуации, $\Delta t = t^* - t_s$; $n(\Phi)$ – количество эксплуатационных факторов в гипотезе Γ_k ; $N(\Omega_k(F))$ – размер серии «полётов» $\Omega_k(F)$, $k \in \{1, 10, 11, 12\}$.

Таким образом, ситуационное дерево \mathbf{T} строится с целью реализации определённой эксплуатационной гипотезы Γ , задающей вариации комплекса возможных нештатных условий полёта по принципу «что ..., если ...?». Такой комплекс есть результат действия и взаимодействия нескольких эксплуатационных факторов Φ_j и формируется автоматически согласно (20), где $j \in \{1, \dots, N(\Phi)\}$ и $N(\Phi)$ – количество гетерогенных факторов, испытанных в дереве \mathbf{T} . Другими словами, правило (20) задаёт «генотип» ситуационного дерева [1]. Источники данных для построения эксплуатационных гипотез – те же, что и для эксплуатационных факторов.

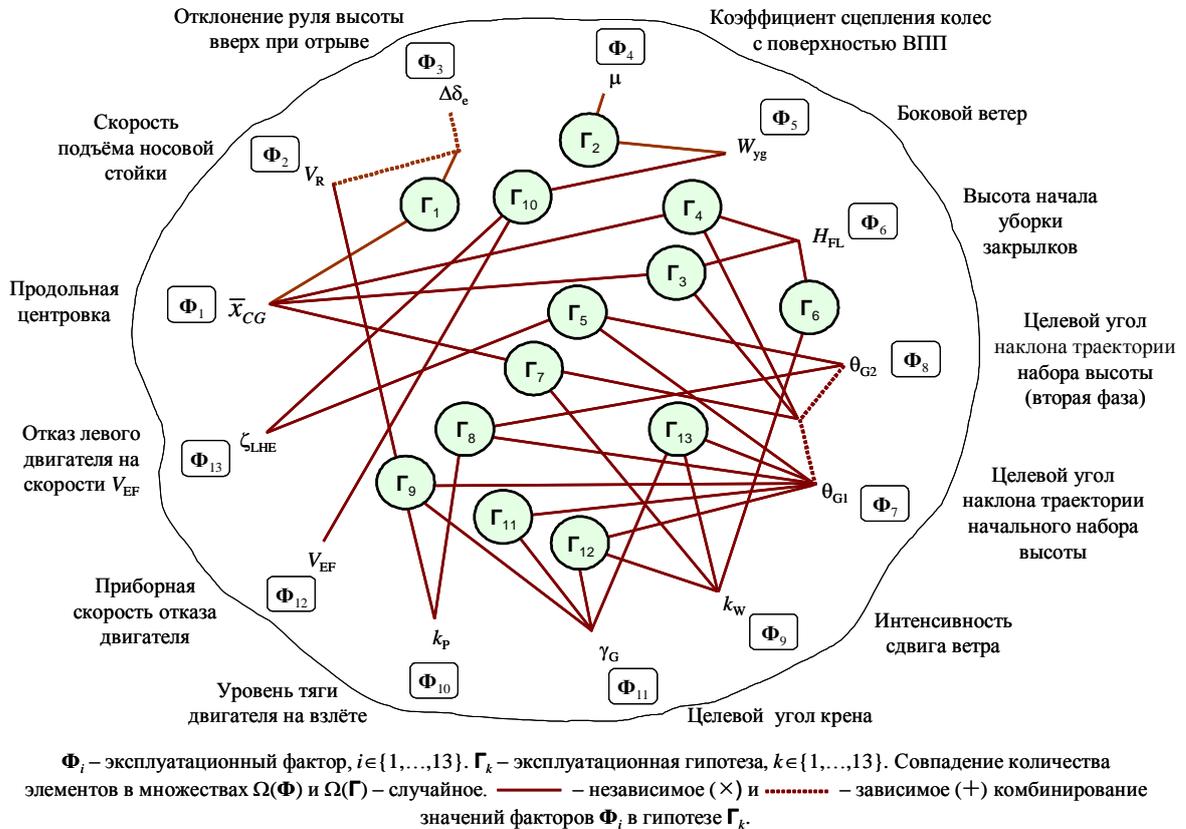


Рисунок 4. Поле испытанных эксплуатационных гипотез.

КОМПЕТЕНТНОСТЬ И СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ СИТУАЦИОННОГО ДЕРЕВА

Так же, как и опыт лётчика, объём знаний, представленных в искусственном ситуационном дереве, может быть измерен. Пусть ситуационное дерево \mathbf{T} есть композиция базового сценария \mathbf{S} и эксплуатационной гипотезы Γ . Тогда суммарный «виртуальный налёт» \mathfrak{Z} [1, 4], аккумулированный в \mathbf{T} , вычисляется по формуле:

$$\mathfrak{Z}|\mathbf{T} = \sum_{i=1}^{N(\mathbf{T})} \Delta t(\mathbf{B}_i) \cdot 3600^{-1} [\div], \quad (21)$$

где \mathbf{T} – ситуационное дерево, $\mathbf{T} \equiv \mathbf{S} \cdot \Gamma$, $N(\mathbf{T})$ – общее количество ветвей-«полётов» в \mathbf{T} , $\Delta t(\mathbf{B}_i)$ – длина ветви \mathbf{B}_i в единицах полётного времени, $i = 1, \dots, N(\mathbf{T})$. Например, для дерева \mathbf{T} , $\mathbf{T} \equiv \mathbf{S}_1 \cdot \Gamma_{11}$, состоящего из 130 ситуаций, продолжительностью по 60 секунд каждая, суммарный «виртуальный налёт» равен: $\mathfrak{Z}|\mathbf{T} \equiv N(\mathbf{T}) \cdot \Delta t \approx 2,2$ ч.

Аналогичным образом может быть вычислен суммарный «виртуальный налёт», накопленный в «лесу» ситуационных деревьев $\Omega(\mathbf{T})$ – множестве композиций базовых сценариев \mathbf{S}_l и эксплуатационных гипотез Γ_k :

$$\mathfrak{Z}|\Omega(\mathbf{T}) = \sum \mathfrak{Z}|\mathbf{S}_l \cdot \tilde{\mathbf{A}}_k, \quad l \in \{1, \dots, N(\mathbf{S})\}, \quad k \in \{1, \dots, N(\tilde{\mathbf{A}})\}, \quad (22)$$

где $N(\mathbf{S})$ и $N(\Gamma)$ – количество базовых сценариев и эксплуатационных гипотез, соответственно; $N(\mathbf{T}) \leq N(\mathbf{S}) \cdot N(\Gamma)$.

Искусственные ситуационные деревья могут использоваться в качестве основы для построения баз знаний бортовых систем различного назначения: определение и мониторинг ограничений, помощь лётчику, восстановление безопасного режима, выполнение сложных акробатических фигур, автономный полёт и др. Специализация «опыта» дерева \mathbf{T} определяется гипотезой Γ , этапом полёта, полётным заданием и типом ЛА [1, 4].

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 применения ЛА и исторический опыт авиационных катастроф и инцидентов. Сравнение показателей \mathfrak{Z} и \mathbf{G} двух операторов ЛА (например, лётчика и автомата) является объективной основой для обоснования автоматической передачи права управления наиболее компетентному из них в предкритической ситуации, начиная с «точки возврата» [1, 4], если в результате прогноза

развития ситуации по **T** распознана угроза «цепной реакции» катастрофы. Такая дилемма может возникнуть, например, при создании искусственно-интеллектуальных систем «встроенной» безопасности полёта ЛА, в частности, для блокирования преднамеренных катастроф, подобных событиям 11 сентября 2001 года в США.

ОКНО БЕЗОПАСНОСТИ

С помощью критериев классификации из таблицы 3 можно решать задачу разбиения дерева-множества многофакторных ситуаций на кластеры равной безопасности на основе анализа информации интегральных спектров, построенных согласно (16). Эти критерии используются в ПМК VATES для автоматического построения семейства графоаналитических форм с высоким уровнем обобщения знаний о безопасности полёта ЛА [2].

В частности, метод классификации многофакторных ситуаций по категориям безопасности положен в основу концепции «окна безопасности». ПМК VATES позволяет строить двухмерные окна безопасности, которые наглядно показывают совместное влияние двух произвольных эксплуатационных факторов Φ_a и Φ_b на безопасность полёта. При построении окна безопасности последовательно решаются две задачи:

- разбиение множества «полётов» $\Omega(F)$, отличающихся значениями факторов Φ_a и Φ_b , на кластеры (17);
- отображение информации о кластере безопасности и значениях Φ_a , Φ_b для каждой ситуации из $\Omega(F)$.

Пусть множеству-дереву родственных «полётов» $\Omega(F)$, $\Omega(F) = \{F_{(1),(1)}, \dots, F_{(i),(j)}, \dots, F_{(m),(n)}\}$, соответствует множество пар значений эксплуатационных факторов Φ_a и Φ_b :

$$\{(\Phi_{a(1)}, \Phi_{b(1)}), \dots, (\Phi_{a(i)}, \Phi_{b(j)}), \dots, (\Phi_{a(m)}, \Phi_{b(n)})\}, \quad (23)$$

где $\Phi_{a(1)} > \Phi_{a(2)} > \dots > \Phi_{a(m)}$ – отношение упорядочивания значений первого фактора Φ_a по вертикали сверху-вниз, а $\Phi_{b(1)} < \Phi_{b(2)} < \dots < \Phi_{b(n)}$ – отношение упорядочивания значений второго фактора Φ_b по горизонтали слева-направо. Тогда окно безопасности – это матрица $W(\Phi_a, \Phi_b)$ размерностью $m \times n$ с координатами Φ_a и Φ_b , где w_{ij} – ячейка, расположенная на пересечении i -той строки и j -того столбца, $w_{ij} = [(\Phi_{a(i)}, \Phi_{b(j)}), \xi^k_{ij}]$, $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, k \in \{I, \dots, V\}$. Ячейка w_{ij} содержит следующую информацию:

- $(\Phi_{a(i)}, \Phi_{b(j)})$ – значения испытываемых эксплуатационных факторов Φ_a и Φ_b ; причём значения первого фактора одинаковы в пределах столбца, а значения второго фактора одинаковы в пределах строки;
- ξ^k_{ij} – цвет кластера k , к которому принадлежит «полёт» $F_{(i),(j)}$, $k \in \{I, \dots, V\}$, $\xi^k_{ij} \in \{\xi^I, \xi^{II-a}, \xi^{II-b}, \xi^{III}, \xi^IV, \xi^V\}$.

На рисунке 5 показано окно безопасности, построенное для ситуаций композиции $S_1 \cdot \Gamma_{11}$: «Взлёт нормальный, начальный набор высоты, вариации/ошибки выдерживания целевых углов θ_{G1} и γ_G », где $\theta_{G1} \equiv \Phi_7$ и $\gamma_G \equiv \Phi_{11}$, $\Omega(\theta_{G1}) = \{2^\circ; 4^\circ; \dots; 20^\circ\}$ и $\Omega(\gamma_G) = \{-45^\circ; -37.5^\circ; \dots; 45^\circ\}$ – см. также рисунок 4 и таблицы 1, 4. 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 $\Gamma_{11} = \Phi_7 \times \Phi_{11}$. Из рисунка 5 также следует, что окно безопасности для условий Γ_{11} имеет потенциально опасный «угол» с координатами $(\theta_{G1}; \gamma_G) \in (12^\circ \dots 14^\circ; -37.5^\circ \dots -30^\circ)$. Здесь возможен быстрый переход **3** состояний системы из безопасной области в опасную (**I, II-a** → **IV**), минуя промежуточные категории **II-b** и **III** (см. рисунок 5). Поэтому полёт в таких «углах» требует от оператора повышенного внимания и аккуратного пилотирования.

Таким образом, окно безопасности даёт интуитивно понятную, интегральную картину возможных последствий реализации нестандартных сценариев полёта при воздействии комплекса эксплуатационных факторов.

«ТОПОЛОГИЯ» БЕЗОПАСНОСТИ

Концепция окна безопасности является основой для построения картин систематического прогноза безопасности полёта ЛА в многофакторных условиях эксплуатации, с учётом физики и логики поведения системы.

Пусть имеется серия «полётов» $\Omega(F)$, представляющих композицию **S**·**Г**. Пусть все «полёты» из $\Omega(F)$ отображены в виде окна безопасности $W(\Phi_a, \Phi_b)$ и классифицированы по категориям $\{I, II, \dots, V\}$, где $\Phi_a, \Phi_b \in \{\Phi_{j(1)}, \dots, \Phi_{j(N(\Phi))}\}$. Тогда в окне безопасности можно выделить следующие характерные топологические объекты **1**, ..., **6** (рисунок 6): «долина», «озеро», «холм», «пропасть», «склон», «обрыв».

«Долина» – это подмножество соседних «полётов» из $\Omega(F)$ – ячеек w в проекции на плоскость окна $W(\Phi_a, \Phi_b)$, которые классифицируются как безопасные, штатные сценарии, имеющие зелёную или салатную окраску (ξ^I или ξ^{II-a} , соответственно), то есть как ситуации категорий **I, II-a** – см. объекты **4** на рисунке 6.

«Озеро» – это подмножество соседних, в проекции на плоскость окна $W(\Phi_a, \Phi_b)$, «полётов» из $\Omega(F)$, классифицируемых как оптимальные сценарии, максимизирующие безопасность или эффективность полёта. Эти сценарии (ячейки) имеют бирюзовую окраску ξ_T в окне $W(\Phi_a, \Phi_b)$. Сценарии из оптимального подмножества принадлежат категориям **I** и **II-a** – см. объекты **5** на рисунке 6.

«Холм» – это подмножество соседних, в проекции на плоскость окна $W(\Phi_a, \Phi_b)$, «полётов» из $\Omega(F)$, классифицируемых как заведомо опасные сценарии, имеющие красную окраску ξ^IV , то есть как ситуации категории **IV** – см. объекты **2** на рисунке 6.

«Пропасть» («овраг») – это подмножество соседних, в проекции на плоскость окна $W(\Phi_a, \Phi_b)$, «полётов», классифицируемых как катастрофические сценарии, имеющие чёрную окраску ξ^V , то есть как ситуации категории **V** – см. объекты **1** на рисунке 6.

$W_{vg\ min}$	-6	-6	-9	-12	-12	-12	-9	-9
$W_{vg\ max}$	9...12	9...12	9...12	9...12	9...12	9	9	9

Проведенный анализ позволяет сформулировать некоторые рекомендации по пилотированию и ограничениям самолёта при взлёте в условиях бокового ветра и отказа левого двигателя (в ситуациях композиции $S_5 \cdot \Gamma_{10}$):

- Разбег необходимо прекратить, если: (а) отказ левого двигателя происходит на скорости $V_{EF} \in [100; 145]$ км/ч и (б) порывы бокового ветра справа превышают 6...12 м/с.
- При необходимости выполнения продолженного взлёта в условиях бокового ветра и отказа двигателя предельно допустимая скорость ветра устанавливается согласно таблице 5 в зависимости от скорости V_{EF} .
- При отказе левого двигателя на разбеге боковой ветер справа значительно более опасен, чем боковой ветер слева. При сильном боковом ветре справа возможны резкие переходы состояний самолёта из безопасной зоны в катастрофическую для пар значений (V_{EF}, W_{vg}) , окрашенных в красный цвет на рисунке 9.
- Безопасные значения ключевых целевых параметров сценария S_5 в условиях Γ_{10} : $\theta_{G1} \approx 2^\circ$, $\theta_{G2} \approx 1^\circ$, $\gamma_G \approx 0$.

ПРИНЦИПЫ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПОЛЁТА

Пусть на борту ЛА имеются средства измерения эксплуатационных факторов Φ_a , Φ_b и Φ_c в полёте. Пусть также для ряда последовательных моментов полётного времени $\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ построены окна безопасности $W(\Phi_a, \Phi_b)|_{t_0}$, $W(\Phi_a, \Phi_b)|_{t_1}$, $W(\Phi_a, \Phi_b)|_{t_2}$, Тогда семейство окон безопасности вида:

$$W(\Phi_a, \Phi_b)|_{t_i} \wedge \Phi_c = \Phi_c(t_i), t_i = t_0, t_1, t_2, \dots, \quad (26)$$

есть динамический визуальный образ, который характеризует влияние третьего (критического) фактора Φ_c на картину безопасности полёта ЛА в условиях влияния первых двух факторов Φ_a и Φ_b . В наборе (26) запись $\Phi_c = \Phi_c(t_i)$ – это формат, содержащий название и значение фактора Φ_c в момент времени t_i .

Эргономическая реализация последовательности (26) на борту ЛА представляет собой виртуальную среду реального времени, предназначенную для решения задач активного управления безопасностью полёта в сложных (многофакторных) условиях. В частности, это могут быть следующие задачи: динамический прогноз состояния безопасности полёта, контроль разнородных лётно-эксплуатационных ограничений, коррекция тактики управления в условиях вероятного или фактического доминирования комплекса факторов $\{\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c\}$.

На основании полученных результатов можно построить следующий типовой алгоритм активного управления безопасностью полёта ЛА в многофакторных условиях.

1. В начале очередного этапа (участка, сегмента, фазы) полёта, в зависимости от режима движения и управления ЛА, состояния бортовых систем, ожидаемой погоды по маршруту, желания оператора и других условий, выбирают критические факторы, по которым целесообразно иметь оперативный прогноз безопасности. Как правило, количество таких факторов, $n(\Phi)$, не превышает двух-четырёх. Набор контролируемых факторов уточняют в ходе полёта – вручную или автоматически – в зависимости от ветвления ситуации.

2. Эксплуатационные факторы из контролируемого набора сортируют по степени критичности, формируя упорядоченное множество-список $\{\Phi_1, \dots, \Phi_{n(\Phi)}\}$. Задают интервал времени оперативного прогноза $[t_0; t_0 + \Delta]$, где t_0 – время начала прогноза относительно текущего момента времени, Δ – глубина прогноза.

3. Из списка $\{\Phi_1, \dots, \Phi_{n(\Phi)}\}$ выбирают пару наиболее важных, актуальных факторов (Φ_a, Φ_b) и третий – критический – фактор Φ_c . Из бортовой базы знаний – «леса» ситуационных деревьев $\Omega(\mathbf{T})$ – выбирают дерево композиции $\mathbf{S} \cdot \mathbf{G}$, которая соответствует текущей ситуации и её планируемому продолжению в условиях $\{\Phi_1, \dots, \Phi_{n(\Phi)}\}$, где \mathbf{S} – базовый сценарий этапа, \mathbf{G} – эксплуатационная гипотеза, включающая Φ_a и Φ_b .

4. В оперативную память ЭВМ загружают часть кроны поддерева \mathbf{T}' , которая соответствует участку прогноза $[t_0; t_0 + \Delta]$ и значениям факторов $\{\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c\}$, $\mathbf{T}' \subset \mathbf{T}$. Поддерево \mathbf{T}' анализируют и получают разбиение (17).

5. На основе этой информации строят окно безопасности $W(\Phi_a, \Phi_b)$. Содержимое окна $W(\Phi_a, \Phi_b)$ обновляют в зависимости от текущих значений Φ_c и относительного времени t , получая последовательность вида (26).

6. Применяя алгоритм (19), для ситуаций из \mathbf{T}' оценивают показатель $(\chi^{IV} + \chi^V)$ – вероятность попадания состояния системы в зоны (ξ^{IV}, ξ^V) на отрезке времени $[t_0; t_0 + \Delta]$. Если $(\chi^{IV} + \chi^V) > \chi_{\max}$, где χ_{\max} – порог принятия решения, то это означает, что возникла угроза безопасности полёта, поэтому необходимо принять срочные меры для её восстановления. Величина χ_{\max} определяет «точку возврата» и корректирующее управление [1, 4].

7. Начиная с «точки возврата», реализуют сценарий корректирующего управления. Это сценарий наиболее безопасной ветви из \mathbf{T} , продолжающей текущую ситуацию. Корректирующий сценарий выполняют вручную или автоматически – в зависимости от уровня сложности ситуации, назначения системы, типа и состояния ЛА, полётного задания, этапа полёта, квалификации и состояния оператора, других условий. В первом случае параметры сценария могут определяться, например, с помощью дисплея ситуационного прогноза полёта [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен метод прогнозирования свойств безопасности полёта ЛА в многофакторных ситуациях на основе результатов аэродинамического проектирования и ситуационного моделирования. Кратко изложены теоретические основы метода. Описаны примеры построения и анализа «топологии» безопасности взлёта ЛА для

сложных эксплуатационных гипотез. Выявлены характерные топологические объекты, которые могут либо ускорять, либо тормозить развитие как безопасных, так и катастрофических исходов полёта в сложных условиях.

Предложен способ получения и отображения рекомендаций по управлению ЛА и ограничений на допустимый уровень сложности и опасности многофакторных ситуаций в виде окон безопасности. Продемонстрированы принципы обучения лётчиков на основе формирования «внутреннего дерева» знаний о физике и логике развития многофакторных полётных ситуаций. Изложены принципы активного управления состоянием безопасности полёта в реальном времени.

Разработанный метод целесообразно использовать при решении следующих задач:

- комплексная оценка влияния особенностей аэродинамики, управления ЛА и эксплуатационных факторов на динамику и безопасность полёта;
- обучение линейных лётчиков, лётчиков-инструкторов, лётчиков-испытателей;
- разработка бортовых систем «встроенной» безопасности полёта, в том числе для блокирования преднамеренных катастроф и ситуаций неуправляемого полёта ЛА;
- исследование баз знаний и механизмов принятия решений для интеллектуальных систем управления высокоавтономных беспилотных и пилотируемых ЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Burdun, I.Y., and Parfentyev, O.M., «Fuzzy Situational Tree-Networks for Intelligent Flight Support», *Int. Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 12 (1999), pp. 523-541.
2. Burdun, I.Y., and Burdun, E.I., «VATES – Virtual Autonomous Test and Evaluation Simulator (Version 7 – Professional)», User's Manual, Atlanta, USA, 2000, 155 pp.
3. Burdun, I.Y., and Parfentyev, O.M., «Analysis of Aerobatic Flight Safety Using Autonomous Modeling and Simulation» (Paper 2000-01-2100), *Proc. of the 2000 Advances in Aviation Safety Conference, April 11-13, 2000, Daytona Beach, FL (P-355)*, SAE, USA, 2000, pp. 75-92.
4. Burdun, I.Y., «Prediction of Aircraft Safety Performance in Complex Flight Situations» (Paper 2003-01-2988), *Proc. of the 2003 Advances in Aviation Safety Conference, September 8-12, 2003, Montreal, Canada*, SAE Aerospace, USA, 2003, 18 pp.
5. Бурдун И.Е., «Изучение физики и логики сложных полётных ситуаций с помощью программно-моделирующего комплекса VATES», *Труды 2-й конференции «Тренажерные технологии и обучение: новые подходы и задачи», 24-25 апреля 2003 года, ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского*, 2003, г. Жуковский, с. 128-138 (на CD-ROM).
6. Бурдун И.Е., «Метод анализа и оценки безопасности полёта в сложных ситуациях с помощью системной модели типа 'лётчик – самолёт – эксплуатационная среда' на этапе проектирования», *Труды VII Российско-китайской конференции «Аэродинамика, динамика полета и прочность летательных аппаратов», 12-15 августа 2003 года, ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского*, г. Жуковский, с. 84-94.
7. Burdun, I.Y., «The Intelligent Situational Awareness And Forecasting Environment (The S.A.F.E. Concept): A Case Study» (Paper 981223), *Proc. of the SAE Advances in Flight Safety Conference, April 6-8, 1998, Daytona Beach, FL (P-321)*, SAE, USA, 1998, pp. 131-144.

© Бурдун И.Е., 2004

$$\pi = \{ \square, \blacksquare, \square, \blacksquare, \square, \blacksquare, \dots \}$$

□, ■ – «белый» или «серый» цвет (ξ_w); ■ – «зелёный» цвет (ξ_G);
 ■ – «бирюзовый» цвет (ξ_T); ■ – «жёлтый» цвет (ξ_Y);
 ■ – «красный» цвет (ξ_R); ■ – «чёрный» цвет (ξ_B)

a) палитра безопасности полёта

$$\square < \blacksquare < \square < \blacksquare < \square < \blacksquare$$

b) отношение порядка цветов безопасности

$$\begin{aligned} x_i(t) \in [x_{i \min}; x_{i \max}] \vee x_i(t) \in (x_{i \min}; x_{i \max}] &\Rightarrow \xi(x_i(t)) = \blacksquare \wedge \text{состояние типа «катастрофа»}, \\ x_i(t) \in [x_{i \min}; a] \vee x_i(t) \in (d; x_{i \max}] &\Rightarrow \xi(x_i(t)) = \blacksquare \wedge \text{состояние типа «опасность»}, \\ x_i(t) \in [a; b] \vee x_i(t) \in (c; d] &\Rightarrow \xi(x_i(t)) = \blacksquare \wedge \text{состояние типа «внимание»}, \\ x_i(t) \in [b; c] &\Rightarrow \xi(x_i(t)) = \blacksquare \wedge \text{состояние типа «норма»}, \\ x_i(t) \in [x_{i \text{opt}1}; x_{i \text{opt}2}] &\Rightarrow \xi(x_i(t)) = \blacksquare \wedge \text{состояние типа «оптимум»}, \\ x_i(t) \in \emptyset &\Rightarrow \xi(x_i(t)) = \square \wedge \text{состояние типа «неопределённость»} \end{aligned}$$

c) правило раскрашивания области определения системной переменной в цвета безопасности

$$\begin{aligned} (\xi(x_i(t_*)) = \square, \xi(x_i(t_* + \Delta)) = \square, \xi(x_i(t_* + 2 \cdot \Delta)) = \blacksquare, \\ \xi(x_i(t_* + 3 \cdot \Delta)) = \blacksquare, \xi(x_i(t_* + 4 \cdot \Delta)) = \blacksquare, \xi(x_i(t_* + 5 \cdot \Delta)) = \blacksquare, \\ \xi(x_i(t_* + 6 \cdot \Delta)) = \blacksquare, \xi(x_i(t_* + 7 \cdot \Delta)) = \blacksquare, \dots, \\ \xi(x_i(t_* + (n - 2) \cdot \Delta)) = \blacksquare, \xi(x_i(t_* + (n - 1) \cdot \Delta)) = \blacksquare) \\ \Rightarrow \Sigma_i = \square \blacksquare \blacksquare \blacksquare \blacksquare \blacksquare \blacksquare \dots \blacksquare \blacksquare \end{aligned}$$

d) пример работы алгоритма построения частного спектра безопасности

$$(p = 5 \wedge \xi(x_1(t)) = \blacksquare \wedge \xi(x_2(t)) = \blacksquare \wedge \xi(x_3(t)) = \square \wedge \xi(x_4(t)) = \blacksquare \wedge \xi(x_5(t)) = \blacksquare) \Rightarrow \xi(t) = \blacksquare$$

e) пример работы алгоритма расчёта штрих-кода интегрального спектра безопасности

$$((\blacksquare \vee \blacksquare) \rightarrow (\blacksquare \vee \blacksquare) \rightarrow (\blacksquare)) \Rightarrow \text{«Склон»}$$

f) определение топологического объекта типа «склон»

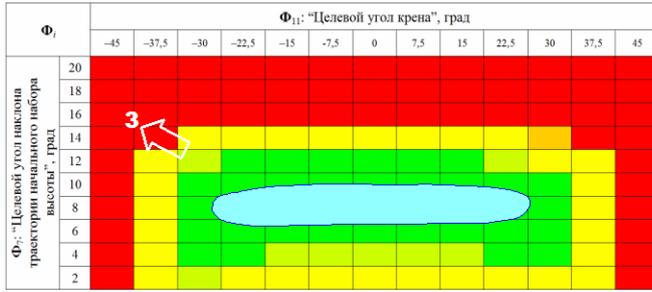
$$(((\blacksquare \vee \blacksquare) \rightarrow \blacksquare) \vee (\blacksquare \rightarrow \blacksquare)) \Rightarrow \text{«Обрыв»}$$

g) определение топологического объекта типа «обрыв»

Рисунок 3. Палитра безопасности полёта. Отношение порядка цветов безопасности. Правило раскрашивания области определения системной переменной в цвета безопасности. Примеры работы алгоритмов построения частного и интегрального спектров безопасности. Определение топологических объектов типа «склон» и «обрыв».

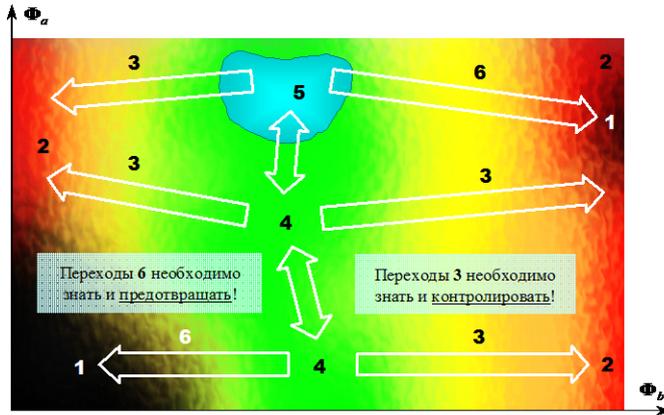
Таблица 3. Категории безопасности полёта и критерии классификации ситуаций

Категория безопасности полёта			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 «жёлтой» зоне, с последующим покиданием её к концу ситуации
	II-a	Условно-безопасные, а	Допускается временное пребывание состояния системы у ограничений, то есть в «жёлтой» зоне
	II-b	Условно-безопасные, б	Допускается длительное пребывание состояния системы у ограничений, то есть в «жёлтой» 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 (запрещённые)	Наблюдается значительное нарушение ограничений, то есть временное или длительное нахождение состояния системы в «красной» зоне, либо состояние системы остаётся 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



I I II-a II-b III IV – окраска уровней и категории безопасности.

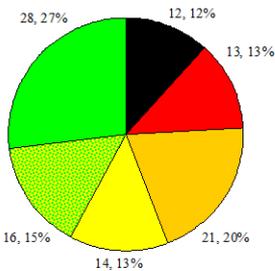
Рисунок 5. Окно безопасности полёта для ситуаций $S_1\text{-}\Gamma_{11}$: «Взлёт нормальный. Вариации/ошибки выбора целевых углов наклона траектории и крена при наборе высоты».



I I II-a II-b III IV V – окраска уровней и категории безопасности.

1 – «пропасть» (катастрофа), 2 – «холм» (опасность), 3 – «склон» (обратимые опасные переходы), 4 – «долина» (нормальная безопасность), 5 – «озеро» (максимальная безопасность, оптимум), 6 – «обрыв» (необратимые катастрофические переходы, «цепная реакция» лёгкого происшествя), Φ_a, Φ_b – испытываемые эксплуатационные факторы (координаты окна безопасности).

Рисунок 6. К определению «топологии» безопасности полёта.



Категория	n_j	$\chi_j, \%$
I	27	27
II-a	15	15
II-b	13	13
III	20	20
IV	13	13
V	12	12
$N(\Omega_{10}(F)) = 104$		100

Рисунок 8. Распределение шансов безопасности полёта в 104 ситуациях композиции $S_5\text{-}\Gamma_{10}$.

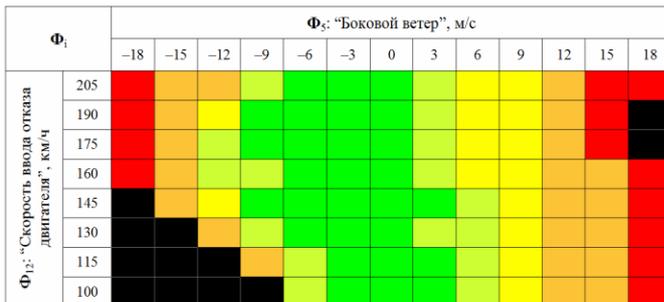
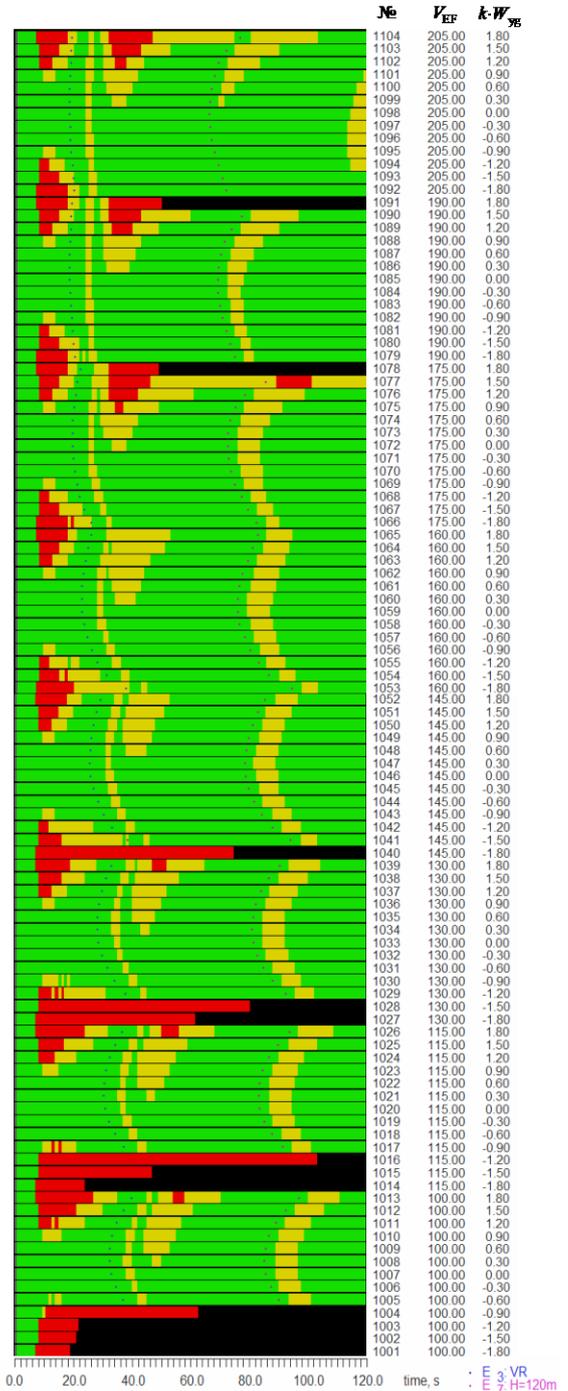


Рисунок 9. Окно безопасности полёта для композиции $S_5\text{-}\Gamma_{10}$.



$N(i)$ – код «полёта»; $\Omega_{10}(F) = \{F_{1001}, \dots, F_p, \dots, F_{1104}\}$;
 $\Gamma_{10} = \Phi_{13} \times \Phi_{12} \times \Phi_5 \equiv \zeta_{LHE} \times V_{EF} \times W_{EF}$; $k = 10^{-1}$;
 E_3, E_7 – события полёта

Рисунок 7. Семейство интегральных спектров безопасности полёта для ситуаций композиции $S_5\text{-}\Gamma_{10}$: «Взлёт продолженный. Отказ левого двигателя на скорости V_{EF} . Вариации скорости отказа двигателя и скорости бокового ветра».