

Изучение физики и логики сложных полётных ситуаций с помощью программно-моделирующего комплекса VATES^{*†‡}

Бурдун И.Е.[§]

При определённом редком стечении обстоятельств в поведении системы “оператор (лётчик, автомат) – ЛА – эксплуатационная среда” может спонтанно образоваться цепь сильных причинно-следственных связей, необратимо ведущих к лётному происшествию (ЛП). Такая полётная ситуация (ПС) развивается как *цепная реакция* и имеет пять *характерных признаков* [1]:

- лавинообразное накопление “критической массы” опасных событий и процессов;
- перекрёстное влияние нескольких разнородных эксплуатационных факторов (ЭФ);
- инерция причинно-следственного механизма;
- несогласованность действий лётчика и автоматики;
- существование “точки возврата” – последнего момента времени для восстановления безопасного режима.

На **рис. 1** представлен механизм развития катастрофы самолёта А320 при посадке в условиях ливня и возможного сдвига ветра в аэропорту Океша (г. Варшава, 14.09.1993г.).

Из анализа ситуации следует, что “цепная реакция” была буквально запрограммирована в динамике и логике поведения системы. В частности, концевой выключатель, блокирующий срабатывание реверса тяги *в воздухе* (см. связи 5-7), фактически стал триггером необратимой цепи ЛП в сложных условиях *посадки*. (Примечание. Выключатель был установлен на самолётах типа А320 после катастрофы самолёта Боинг-767-300ER, которая произошла в результате самопроизвольного включения реверса тяги левого двигателя при наборе высоты.)

В подобной ситуации *любое* управляющее действие после “точки возврата” неэффективно или неадекватно. Поэтому сведение причин многозвенных катастрофических ситуаций к так называемой “ошибке лётчика”, “человеческому фактору” некорректно. Такое

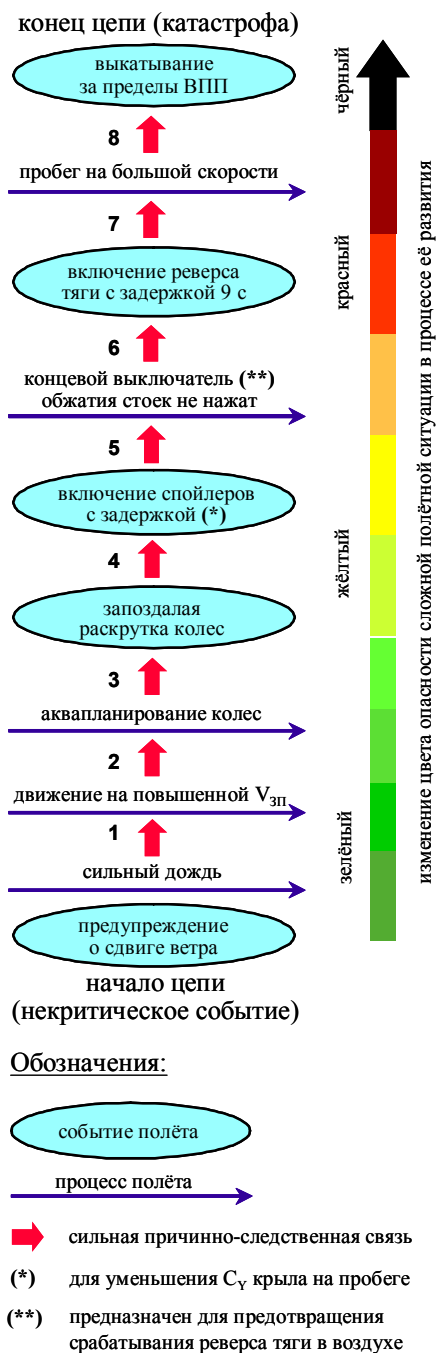


Рис. 1. Пример катастрофы типа “цепная реакция”

* © Бурдун И.Е., 2003-2007 гг.

† Доклад по материалам статьи был представлен на 2-й конференции “Тренажерные технологии и обучение: новые подходы и задачи”, ФГУП “ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского”, 24-25 апреля 2003 года, г. Жуковский, Московская область.

‡ Данный вариант статьи несколько отличается от исходного варианта, опубликованного в трудах конференции, и включает дополнения и уточнения от 21.04.2003г., а также исправления обнаруженных технических ошибок, которые были допущены в графическом материале статьи при издании сборника трудов конференции на CD-ROM.

§ Устаревшие сведения о месте работы автора опущены.

упрощение также не помогает пониманию сущности явления и его профилактике.

Глубинной причиной катастроф типа “цепная реакция”, на наш взгляд, является сложность и неоднозначность переходов состояния системы в многофакторном ситуационном пространстве полёта, дефицит *априорной* информации о динамике и логике развития таких ситуаций. Пробелы и ошибки знаний специалиста (конструктора, испытателя, инструктора, лётчика) о возможных нестандартных вариантах поведения системы повышают риск катастроф данного типа.

Отсюда следует, возможно, *наиболее общее объяснение* причин таких ЛП – не устранённое в полёте несоответствие между ранее неизвестным нестандартным (опасным) и предписанным (безопасным) сценарием ситуации. Очевидно, что при изучении сложных (многофакторных) ПС необходимо учитывать нелинейность, многомерность, причинность и комбинаторный характер поведения реальной системы.

Один из возможных подходов к более надёжному решению проблемы – это совместное использование современных и традиционных методов – аэродинамики и динамики полёта ЛА, математического моделирования, вычислительного эксперимента (ВЭ), искусственного интеллекта, нечётких множеств, теории графов, ситуационного управления, динамических структур данных, компьютерной графики и др.

Автором разработан *программно-моделирующий комплекс (ПМК) VATES* – Virtual Autonomous Test & Evaluation Simulator (v.7), реализующий данный подход [2]. В состав ПМК VATES входят: ситуационная модель действий лётчика, обобщённая непрерывно-дискретная модель ПС, алгоритмы планирования, имитации и отображения сложных сценариев полёта, методы оценки и классификации “полётов” по критериям безопасности (эффективности).

Назначение комплекса – это воспроизведение, детальный анализ и оценка сложных (многофакторных) полётных ситуаций на ЭВМ в автономном (т.е. без участия лётчика) эксперименте типа “что ..., если ...?”. Конечная цель моделирования состоит в том, чтобы помочь пользователю сформировать более полный внутренний “образ полёта” ЛА в различных нестандартных условиях.

Полёт ЛА моделируется на двух взаимосвязанных уровнях (рис. 2): микро-структурный (модель одиночной ситуации) и макро-структурный (модель множества ситуаций).

“Микроструктура” полёта представлена сценарием полётной ситуации S [1]. Сценарий ПС – это ориентированный граф, который определяется двумя множествами: $\Omega(E)$ – календарь событий полёта E (дискретные компоненты S – суть вершины графа) и $\Omega(\Pi)$ – список процессов полёта Π (непрерывные компоненты S – дуги графа).

То есть, $S = \Omega(E) \cup \Omega(\Pi)$, причём $\Omega(\Pi) = \Omega(D) \cup \Omega(B) \cup \Omega(T)$

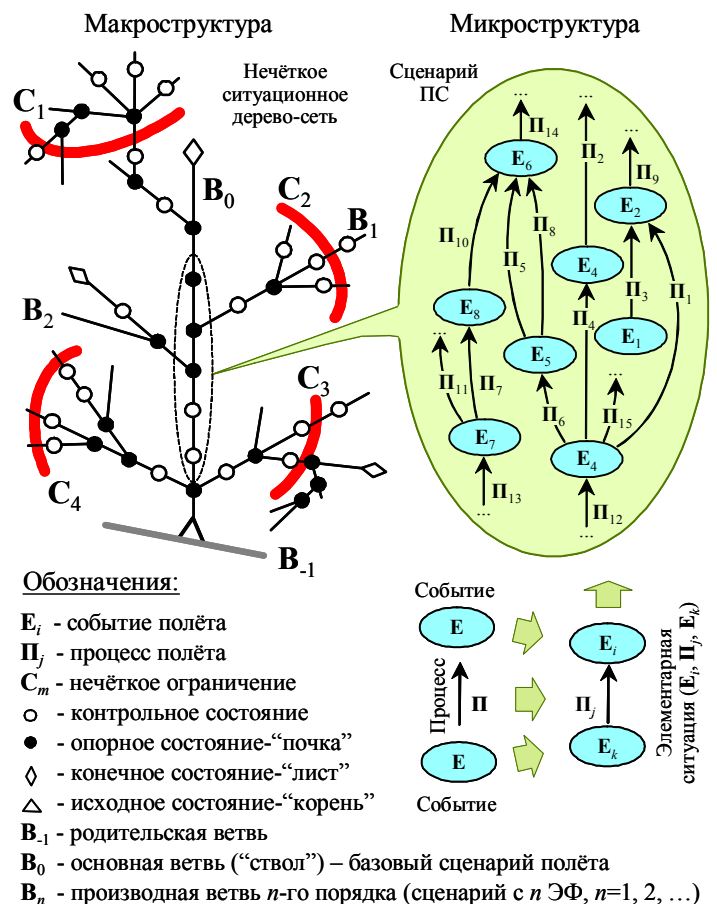


Рис. 2. Связь между микро- и макроструктурой ситуационной модели полёта

$\cup \Omega(P) \cup \Omega(O) \cup \Omega(F) \cup \Omega(W) \cup \Omega(L) \cup \Omega(A) \cup \Omega(R) \cup \Omega(Y) \cup \dots$, где $\Omega(\bullet)$ – подмножество процессов типа \bullet : динамика ЛА (**D**), работа (**B**) и отказ (**F**) бортового оборудования, задача пилотирования (**T**), процедура управления (**P**), наблюдатель состояния системы (**O**), ветер (**W**), турбулентность (**L**), состояние атмосферы (**A**), дождь (**R**), состояние ВПП (**Y**) и др.

Тройка “начальное событие – процесс – конечное событие” (E_i, P_j, E_k) – есть элементарная ситуация (см. рис. 2). Элементарные ситуации – это “блоки”, из которых можно “набрать” в модели содержание ПС практически любого уровня сложности и назначения: катастрофической, испытательной, аэробатической, нештатной, типовой, учебной и др. Файлы-описания множеств $\Omega(E)$ и $\Omega(\Pi)$ подаются на вход автономной модели полёта (ПМК VATES).

Исследуемые эксплуатационные факторы полёта (рис. 3) задаются как вариации параметров и (или) структуры сценария **S**. Таким образом, благодаря применению языка “события-процессы” в модели унифицирована форма задания гетерогенных условий полёта. Метод апробирован на 22 типах ЛА и проектах и 500+ типах сценариев ситуаций для основных этапов, режимов и условий полёта.

Однако в реальной эксплуатации полёты, как правило, отличаются от идеальных, желаемых сценариев и между собой. Совокупность возможных вариаций некоторой заданной полётной ситуации образует т.н. “макроструктуру” полёта (см. рис. 2).

Макроструктура полёта представляется и моделируется в виде ситуационного дерева (СД) **T**. Его ствол B_0 – это “полёт”, соответствующий некоторому базовому (стандартному, катастрофическому или любому другому) сценарию **S**. Ветвь i -того уровня $B_i, i = 1, 2, \dots$, получают путем введения в сценарий предыдущего уровня новых ЭФ согласно генотипу ситуационного дерева.

Генотип СД (эксплуатационная гипотеза) **G** – это правило комбинирования эксплуатационных факторов в структуре ситуационного дерева и генерации на этой основе множества ветвей-“полётов” B_i , представляющих отклонения от B_0 . Дуги на концах ветвей (рис. 2) – нарушенные ограничения. VATES позволяет “выращивать” ситуационные деревья в ВЭ на автономной модели, используя аналогии из ботаники и биологии. Отсюда названия элементов и свойств СД (см. рис. 2): “корень”, “почка”, “лист”, “крона”, “генотип” и др. Логическое строение каждой ветви – есть сценарий некоторой нестандартной ситуации, т.е. определённая композиция событий и процессов. В ситуационном дереве время t направлено по ветвям вверх, от “корня” к “листьям”.

Строение, принципы формирования и использования сценариев и ситуационных деревьев полёта близки к “внутренней модели полёта” лётчика. Исследования по психофизиологии деятельности мозга [3] свидетельствуют о том, что опыт человека-оператора по управлению динамическим объектом организован в памяти в виде развитой нейронной структуры, напоминающей дерево-сеть. Данная структура образована из



Пояснения:

- 1 - обледенение ЛА (влияние на аэродинамику). 2 - дождь, ливень (влияние на аэродинамику). 3 - состояние атмосферы (температура, давление). 4 - состояние ВПП (осадки, динамика, уклон). 5 - препятствия, противодействие. 6 - ошибки оператора (тактика, цели, наблюдение, запаздывание, реакция и др.). 7 - ветер (∇ 3-хмерный профиль: порыв, боковой ветер, сдвиг, микровзрыв и др.). 8 - ошибки логики программного обеспечения бортовых систем. 9 - механические отказы (двигателей, управления, шасси и др.). 10 - вариации веса, центровки, моментов инерции ЛА. 11 - вариации сценария полёта, методов управления, ошибки РЛЭ. Примечание: также моделируются произвольные сочетания ЭФ из групп №№1-11.

Рис. 3. Основные группы эксплуатационных факторов

“жгутов” нейронов, между которыми в результате обучения и профессиональной деятельности образуются *устойчивые ситуационные связи* (на биохимическом и других уровнях). В этих связях закодированы образы характерных состояний системы, переходов состояний, условий существенного изменения поведения системы, меры качества полёта (безопасность, эффективность), другая ключевая информация.

Внутреннее “ситуационное дерево-сеть полёта” формируется в долговременной памяти лётчика в процессе освоения им новых ситуаций и эксплуатационных условий полёта (при обучении, в процессе лётной деятельности). Адекватность этих связей проверяется (закрепляется) при повторении знакомых ситуаций на тренажёре или в полёте. Система ситуационно-тактических знаний лётчика не стационарна: её компоненты со временем могут уточняться, дополняться, “тиражироваться”, обобщаться, а также разрушаться, забываться и восстанавливаться.

В общепринятой трёхуровневой системе знаний человека-оператора ситуационно-тактические знания занимают центральное место [1]. Они обеспечивают связь между верхним *стратегическим* (планирующим, “проактивным”) и нижним *автоматическим* (сенсомоторным, “реактивным”) уровнями принятия решений по управлению полётом ЛА. От объёма и качества этих знаний зависит безопасность и эффективность полёта в каждой конкретной ситуации, то есть в ближайшие 3...30 с полёта. Таким образом, роль ситуационно-тактического опыта в деятельности лётчика является определяющей.

Рис. 4 иллюстрирует идеальный процесс формирования ситуационно-тактического опыта лётчика в долговременной памяти.

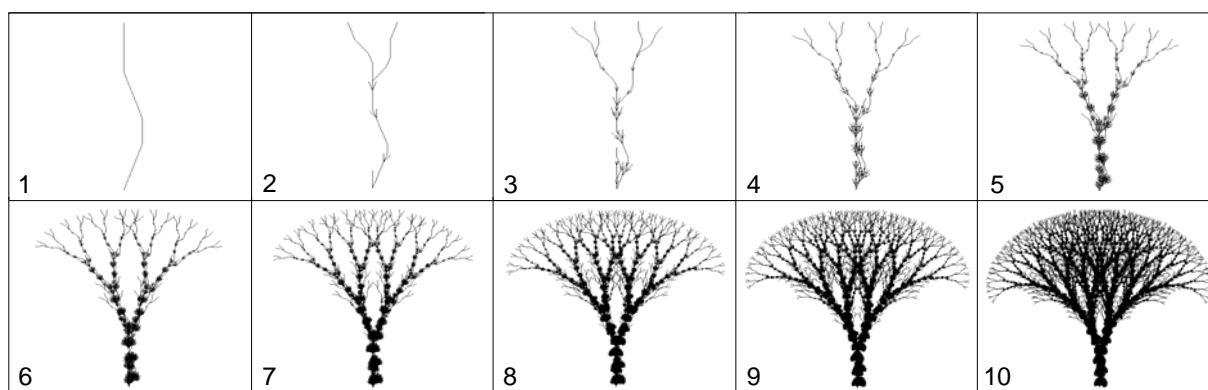


Рис. 4. Рост дерева-фрактала как модель идеального процесса формирования ситуационно-тактического опыта лётчика в долговременной памяти ($k=1$ - опыт курсанта, $k=10$ - опыт эксперта)

На рисунке показаны первые 10 шагов k роста фрактала, имеющего генотип “дерево”. Видно, что количество и толщина (сила) ветвей-связей увеличиваются пропорционально налёту лётчика (k), количеству освоенных им типов сложных ситуаций и испытанных ЭФ. Эти характеристики, в частности, определяют направленность опыта (*специализацию*) и *компетентность оператора*.

Фрактальная аналогия позволяет выявить *корни неадекватных или ошибочных решений* лётчика в нестандартных условиях эксплуатации**. Это пробелы и разрывы в системе ситуационно-тактических знаний, т.е. *структурно-логические дефекты опыта* лётчика. К ним относятся (**рис. 5**):

- недостаточная плотность “кроны” его внутреннего “ситуационного дерева полёта”, особенно вблизи ограничений;

** Фрактальная модель также указывает на первопричину ошибок и сбоев в работе современных бортовых высокоавтоматизированных систем защиты эксплуатационных ограничений и систем планирования и управления полётом ЛА (т.н. Flight Envelope Protection Systems и Flight Management Systems) при попадании ЛА в нестандартные условия. Это несоответствие структуры и содержания базы знаний, запрограммированных в указанных системах, степени сложности многофакторных ситуаций, т.е. использование незрелых ситуационных деревьев, имеющих неадекватные генотипы уровня $k = 3...5$ (см. рис. 4).

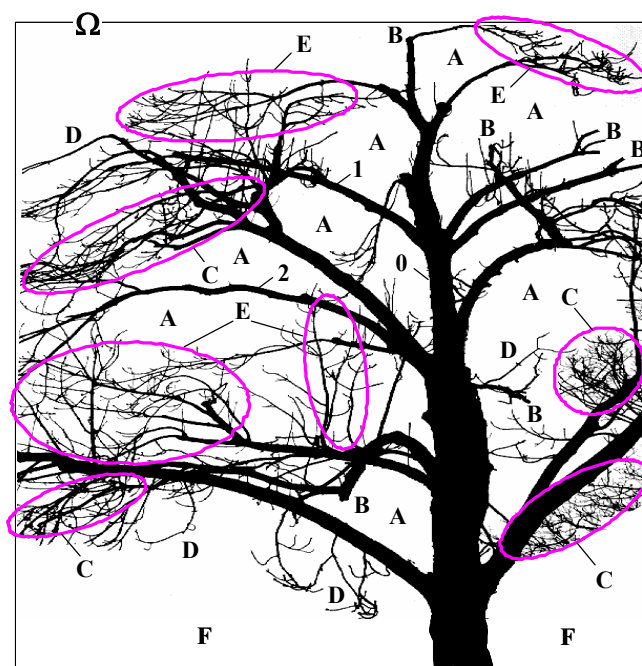
- изначальная “непроецируемость” отдельных состояний, переходов и целых ветвей, особенно в многофакторных условиях;
- бессистемность или случайность приобретения лётного опыта;
- забывание или “затенение” (с возрастом) переходов, ветвей и поддеревьев для условий, которые редко практикуются или труднореализуемы в эксплуатации;
- разрушение связей или их физико-химических носителей вследствие перенесённых травм головы, пиковых перегрузок, влияния алкоголя, других причин;
- несоответствие принимаемого решения фактическим условиям полёта;
- неверное распознавание текущей ситуации или домысливание – в условиях стресса, цейтнота, перегрузок, недомогания – переходов, которые физически невозможны, опасны, либо неэффективны.

Указанные дефекты системы знаний лётчика индивидуальны. Каждому лётчику присущ свой стиль (“почерк”) полёта, математический аналог которого – суть генотип его ситуационно-тактического опыта – “внутреннего дерева-фрактала полёта”. Таким образом, зная внешние проявления этих дефектов, можно построить процесс обучения лётчика с целью коррекции и обогащения генотипа его профессионального опыта. Кроме того, эта информация позволяет, в принципе, настраивать бортовые системы типа “помощник пилота” и программы обучения, в которых используется данный подход, на *конкретного* лётчика и заданный класс сложных ситуаций.

Очевидно, что с позиций обеспечения безопасности полёта и эффективности применения ЛА в сложных (многофакторных) ситуациях должны существовать оптимальные, субоптимальные, приемлемые и неприемлемые генотипы структур ситуационно-тактических знаний оператора (лётчика, автомата).

О важности формирования у лётчика адекватной внутренней модели полёта в многофакторных условиях свидетельствуют определения, данные лётчиками-испытателями [4]: “крайние ситуации”, “... сочетание обстоятельств полета”, “аналитическое описание особенностей поведения самолета на разных режимах полета”, “четкое понимание предела ...”, “множество факторов”, “многообразие факторов”, “... неблагоприятное сочетание обстоятельств”, “... поле возможных решений”, “... множество возможных решений”, “... одновременный параллельный анализ ... разных, невероятных, пересекающихся вариантов решения” и др.

Автором разработана система *графоаналитических форм отображения знаний о БП* (по-английски – Flight Safety Knowledge Maps), реализованных в ПМК VATES, которые соответствуют внутренним представлениям лётчика о структуре сложного ситуационного пространства полёта. Формы предназначены для изучения физики и



Обозначения:

- Ω - пространство сложных полётных ситуаций
- 0 - основной (стандартный, штатный) сценарий (ствол)
- 1 - производный (нештатный) сценарий (ветвь 1-го порядка)
- 2 - производный (нештатный) сценарий (ветвь 2-го порядка)
- A - недостающие знания (отсутствие ветвления)
- B – забытые, затенённые знания (сухие, обломанные ветви)
- C - бессистемные знания (избыточное, хаотичное ветвление)
- D - фрагментарные знания (редкое ветвление)
- E - систематические знания (оптимально-плотное ветвление)
- F - область практически недостижимых ситуаций

Рис. 5. Иллюстрация структурно-логических дефектов системы ситуационно-тактического опыта лётчика при недостатке налёта

логики развития многофакторных полётных ситуаций. К ним относятся: “сценарий ПС”, “нечёткое ограничение”, “ситуационное дерево”, “частный спектр БП”, “интегральный спектр БП”, “диаграмма сложности ПС”, “протокол событий”, “диаграмма хронологии нарушения и восстановления ограничений”, “причинно-следственный механизм БП”, “семейство спектров БП” (“топология БП”), “окно БП” и ряд других. Эти и другие формы получают автоматически на выходе ПМК VATES в результате вычислительного эксперимента [2].

В системной модели также *автоматизировано* решение задач расчёта оценок (“индексов”) БП и разбиения испытанного множества сценариев (“полётов”) на кластеры равной безопасности с использованием пяти классификационных “категорий безопасности” [5].

На **рис. 6** представлен граф обобщённого сценария полёта **S**: “Взлёт нормальный, начальный набор высоты”. Здесь имеем $\Omega(\mathbf{E}) = \{E_1, \dots, E_{12}\}$ и $\Omega(\mathbf{\Pi}) = \{T_1, \dots, T_4, P_1, \dots, P_4\}$, где E_i – это “событие полёта”, T_j – “задача пилотирования” (непрерывное управление с наблюдением), P_k – “процедура управления” (разовое управляющее действие), $i \in \{1, \dots, N(\Omega(\mathbf{E}))\}$, $j \in \{1, \dots, N(\Omega(\mathbf{T}))\}$, $k \in \{1, \dots, N(\Omega(\mathbf{P}))\}$, $N(\Omega(\mathbf{E})) = 12$, $N(\Omega(\mathbf{T})) = 4$ и $N(\Omega(\mathbf{P})) = 4$, где $N(\Omega(\bullet))$ – количество компонент сценария типа \bullet .

Граф-сценарий **S** читается следующим образом. В начале ситуации (событие E_1) “лётчик” переводит двигатели на взлётный режим (P_1) и начинает выдерживать направление разбега по осевой линии ВПП (T_1) до момента отрыва носового колеса (E_2).

На скорости V_R (E_3) руль высоты переключается вверх (P_2). При достижении угла тангажа $\sim 10^\circ$ (E_4) начинает выдерживаться заданный крен $\gamma_{зад}$ и нулевое скольжение (T_2). После отрыва (E_5) устанавливается заданный наклон траектории $\theta_{зад}$ (T_3). Шасси убирается (P_3), начиная с события E_6 . На высоте 120 м (E_7) убираются закрылки (P_4) и вводится задача стабилизации приборной скорости в наборе (T_4). Моделируемая ситуация завершается событием E_8 . События $\{E_9, E_{10}, E_{12}\}$ являются информационными, т.е. они не участвуют в управлении логикой развития ситуации.

Таким образом, понятие сценария позволяет легко, наглядно и компактно описать разнородные причинно-следственные связи, действующие в системе, на едином языке “события-процессы”, который понятен лётчику. Видно также, что структура сценария **S** не изменяется при вариациях параметров событий и процессов.

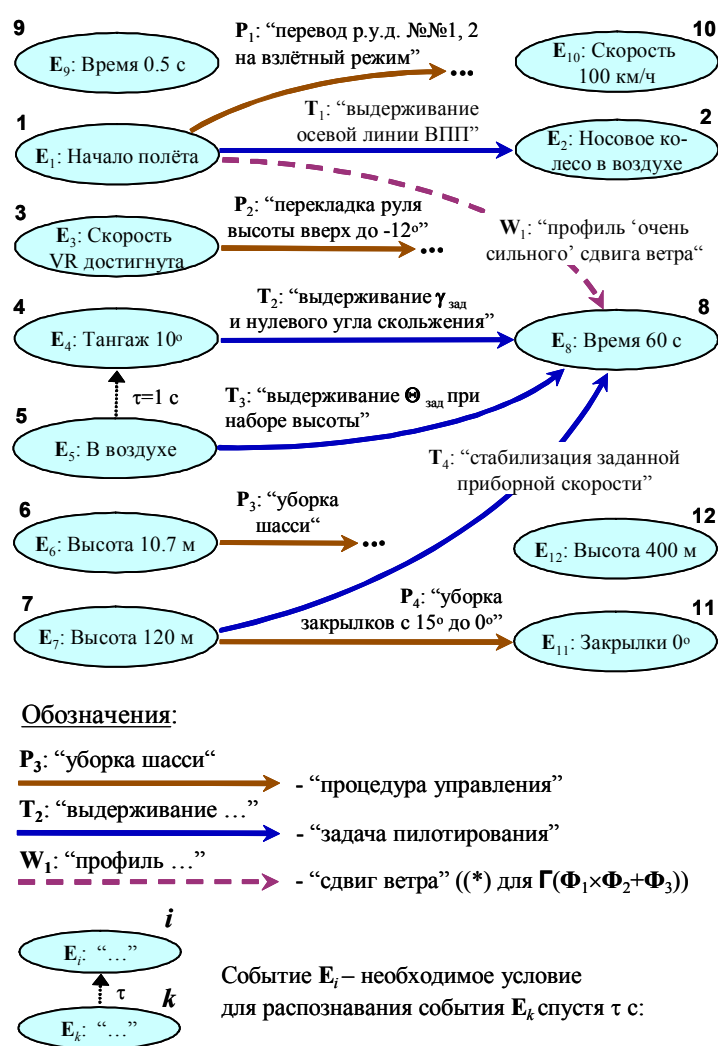


Рис. 6. Сценарий **S**: “Взлёт нормальный, ошибки/вариации выдерживания углов $\Theta_{зад}$ и $\gamma_{зад}$ при наборе высоты”

Для анализа и оценки БП в ПМК используются т.н. “нечёткие ограничения”, впервые введенные Л.А.Заде [6].

Нечёткое ограничение C (рис. 7, в) описывает переход от неприемлемых (опасных) значений некоторой системной переменной x , $x \in \Omega(x)$, к приемлемым (безопасным) значениям плавно, без скачка. Другими словами, у переменной x существуют области значений, которые частично принадлежат к множеству C , т.е. $\mu_C(x) \in]0; 1[$.

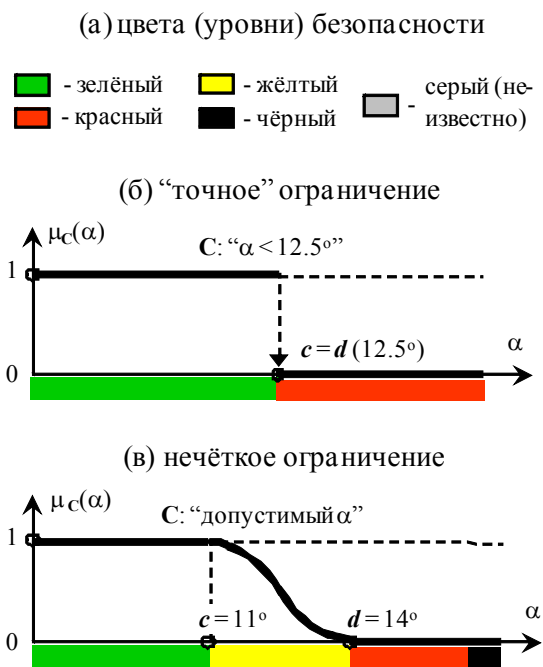
Например, для детерминированного ограничения C : “ $\alpha < 12.5^\circ$ ” значение угла атаки, например, $\alpha = 12,49^\circ$ считается приемлемым, а $\alpha = 12,51^\circ$ – нет (рис. 7, б). Видно, что детерминированное описание ограничений не вполне адекватно отражает неопределённость, присущую реальной системе. Математический аппарат теории нечётких множеств помогает описать точно внутренне неточные категории.

Характерные участки области определения переменной x под нечётким ограничением окрашивают в цвета (уровни) безопасности: ξ_G – зелёный (“норма”), ξ_Y – жёлтый (“внимание”), ξ_R – красный (“опасность”), ξ_B – чёрный (“катастрофа”). Палитра безопасности $\{\xi_G, \xi_Y, \xi_R, \xi_B, \dots\}$ должна отражать опыт экспертов, представления лётчика, требования лётной годности и эргономики в части допустимых, граничных и предельных состояний системы. В палитру $\{\xi_G, \xi_Y, \xi_R, \xi_B, \dots\}$ также вводят серый (белый) цвет ξ_W для обозначения состояний системы типа “неопределённость”, т.е. особых случаев, когда уровень безопасности по какой-либо переменной x не измеряется. Пример определения нечётких ограничений для этапа взлёта перспективного самолёта местных воздушных линий по переменным из $\{V_{пр}, \dot{Z}, Z, N, V_{yg}, n_y, \gamma, \vartheta, \alpha, \beta, \delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_\gamma, \delta_\eta, k_{ш}\}$ дан в [5]. Понятия нечёткого ограничения и палитры безопасности необходимы для построения спектров БП и расчёта оценок безопасности полёта.

На рис. 8 приведен пример частных спектров БП (ЧСБП) и интегрального спектра БП (ИСБП) для ситуации F_{2667} : “Взлёт нормальный и начальный набор высоты, $\theta_{зад} = 18^\circ$, $\gamma_{зад} = +45^\circ$ ”. Там же показан протокол событий, реализованных в данном “полёте”.

Частный спектр БП Σ_k – это зависимость изменения цветов безопасности по времени для переменной x_k , $x_k \in \Omega(x)$. Чтобы построить спектр Σ_k , проверяют выход значений переменной x_k за нечёткое ограничение $C(x_k)$ и устанавливают соответствие между текущими значениями $x_k(t)$ и цветами безопасности $\xi(x_k(t)) \in \{\xi_G, \xi_Y, \xi_R, \xi_B, \xi_W, \dots\}$, $t \in [t(\mathbf{E}^*); t(\mathbf{E}^*)]$. Серая окраска участка ЧСБП означает, что на этом отрезке времени t выход переменной x_k за ограничение не проверяется.

Интегральный спектр БП Σ отражает изменение уровня безопасности некоторого “полёта” в целом, т.е. по всем контролируемым переменным x_k , $x_k \in X$.



Обозначения:

c, d – характерные точки числового носителя нечёткого ограничения C , $\mu_C(x)$ – функция принадлежности нечёткого множества Л.Заде (L.Zadeh)

Рис. 7. Цвета (уровни) безопасности, примеры “точного” и нечёткого ограничений

Интегральный спектр безопасности полёта строится согласно следующему обобщённому алгоритму [6]: $(\forall t) (t \in [t^*, t^*]) (\exists \xi(x_k(t)) (\xi(x_k(t)) \in \{\xi_G, \xi_A, \xi_R, \xi_B, \xi_W, \dots\} \wedge (\xi_W < \xi_G < \xi_Y < \xi_R < \xi_B)) (\xi(t) = \max \xi(x_k(t)), k = 1, \dots, p) \Rightarrow (\xi(t) \in \Sigma \wedge \Sigma = \xi(t^*) \parallel \xi(t^* + \Delta) \parallel \dots \parallel \xi(t^*)),$ где t – время, ξ_i – цвет из палитры БП; $i \in \{G, Y, R, B, W, \dots\}$; $<$ – операция “холоднее” при сравнении степени опасности цветов ξ_i ; \max – операция выбора самого “горячего”, в данный момент t , цвета $\xi(x_k(t))$; \parallel – операция конкатенации штриховых кодов цвета $\xi(t)$ в спектре Σ ; $[t^*, t^*]$ – анализируемый интервал времени, $t^* = t(E^*)$, $t^* = t(E^*)$; Δ – шаг формирования ИСБП по t ; p – количество проверяемых ограничений. В примере $p = 20$, $E^* \equiv E_1$ и $E^* \equiv E_8$. Видно, что интегральный спектр безопасности учитывает степень нарушения всех контролируемых ограничений $C(x_1), \dots, C(x_p)$.

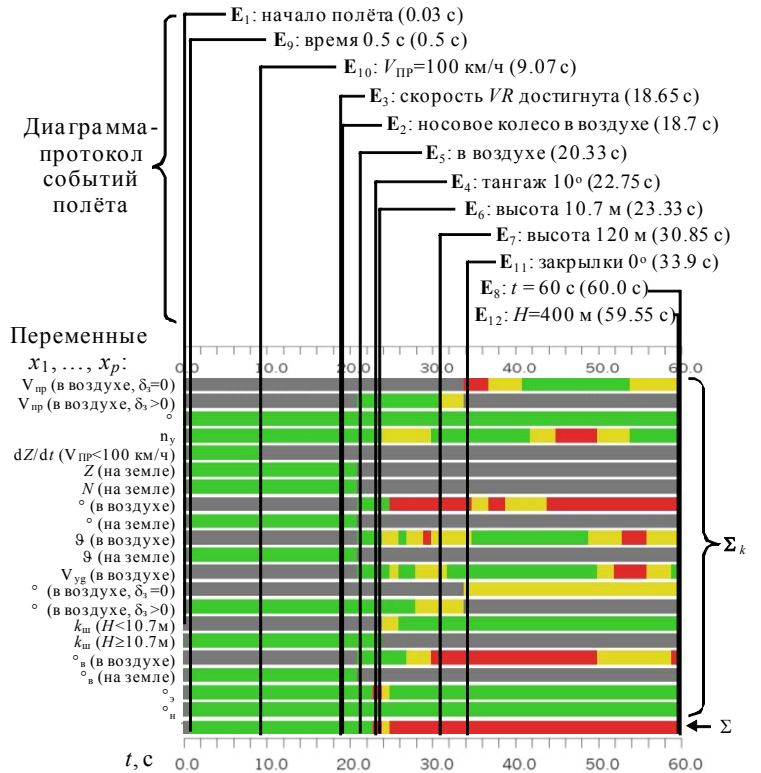
Суть алгоритма состоит в следующем. Для каждого момента времени t в интегральный спектр БП заносится штрих-код, окрашенный в самый “горячий” цвет, зафиксированный в частных спектрах на данный момент времени. Возможны и другие способы учёта информации частных спектров Σ_k в Σ , например: ранжирование и задание “непрозрачных” частных спектров и др. Таким образом, метод позволяет отразить *уровень и динамику опасности сложной ситуации* в виде единого, интуитивно понятного визуального образа.

Комплекс VATES позволяет также строить диаграммы сложности ПС и диаграммы хронологии и зависимости нарушения и восстановления нечётких ограничений [5].

Диаграмма сложности полётной ситуации – это графическое объединение на единой шкале t информации частных спектров БП о выходе состояния системы в жёлтую, красную и чёрную зоны нечётких ограничений, т.е. $\bigcup_{k=1}^p \xi(x_k(t)) = f(t)$, $\xi(x_k(t)) \in \{\xi_Y, \xi_R, \xi_B\}$,

$t \in [t^*, t^*]$. Существенно, что при этом зелёные участки частных спектров БП (состояния типа “норма”) не учитываются.

На **рис. 9** показано сравнение диаграмм сложности двух нестандартных сценариев взлёта **S** при $\theta_{зад} = 16^\circ$, соответственно, для $\gamma_{зад} = -45^\circ$ и $\gamma_{зад} = +45^\circ$. Здесь также указаны переменные x_k , по которым допущены нарушения ограничений C , и длительность (в %) пребывания значений x_k в зонах ξ_Y, ξ_R, ξ_B в зависимости от направления крена. Видно, что в зеркальных ситуациях левого и правого крена характер нарушения ограничений разный. Это можно объяснить аэродинамической асимметрией самолёта – следствие



Обозначения:

Цвета (уровни) безопасности полёта – см. рис. 7; Σ_k – частные спектры БП, $k = 1, \dots, p, p = 20$; Σ – интегральный спектр БП данного “полёта”

Рис. 8. Частные и интегральный спектры БП, протокол событий “полёта” F_{2667} : “Взлёт, начальный набор высоты, $\theta_{зад} = 18^\circ$ и $\gamma_{зад} = +45^\circ$ ”

косой обдувки от винтов. В целом, для данного типа ЛА в рамках эксплуатационной гипотезы $\Gamma(\Phi_1 \times \Phi_2)$ (см. ниже) правый крен незначительно более опасен, чем левый [5].

Таким образом, метод может использоваться для прогнозирования и идентификации многозвенного причинно-следственного механизма нарушения и восстановления эксплуатационных ограничений. Модель также чувствительна к особенностям аэродинамической компоновки самолёта.

Влияние эксплуатационных факторов на сложность полётной ситуации, *оценку (индекс) безопасности полёта* η [5] и характер нарушения ограничений для подмножества сценариев со значениями $\gamma_{зад} = -30^\circ$ и $\theta_{зад} \in \{2^\circ, 4^\circ, \dots, 20^\circ\}$ показано на **рис. 10**.

Видно, что наиболее безопасным (оптимальным) является сценарий с $\theta_{зад} \approx 7^\circ$. Под “наибольшей безопасностью” здесь понимается “равноудаленность” по углу θ состояния системы от всех проверяемых ограничений, в данном случае от вариантов F_{2553} и F_{2618} . Однако индекс БП для оптимального сценария ($\eta = 0.98$) оказывается немного меньше максимального значения, полученного для F_{2566} ($\eta = 0.983$). Видно также, что с ростом угла наклона траектории θ выше 14° красная зона нарушения ограничений быстро расширяется по t справа-налево, в направлении от E_8 к E_3 ; растёт интенсивность этих нарушений. При этом устойчивым “красным” нарушениям ($\sigma(\xi_R) = 1 \dots 2$), как правило, предшествуют всплески выхода значений переменных в жёлтую зону ($\sigma_{max}(\xi_Y) = 2 \dots 3$) за $2 \dots 4$ с до нарушения, где $\sigma(\xi_i)$ – это количество всех нарушений ограничений на уровне ξ_i в момент t . В частности, для оператора это может служить индикатором приближения опасности и оценкой запаса времени для принятия решения.

Таким образом, диаграмма сложности полётной ситуации является носителем ценной информации о динамике и интенсивности процесса множественных нарушений ограничений в полёте.

На **рис. 11** изображено *ситуационное дерево* “полётов” T_{130} – объединение семейства “родственных” траекторий, построенных согласно сценарию S: “Взлёт нормальный и начальный набор высоты” при вариациях/ошибках выдерживания целевых углов $\theta_{зад}$ и $\gamma_{зад}$ (см. рис. 6).

Данное дерево сгенерировано автоматически с помощью ПМК VATES. Генотип дерева T_{130} реализует эксплуатационную (рабочую) гипотезу $\Gamma(\Phi_1 \times \Phi_2)$, где $\Phi_1 \equiv \theta_{зад}$ и $\Phi_2 \equiv \gamma_{зад}$. Значения ЭФ комбинируются в сценарии S по правилу Декартова произведения

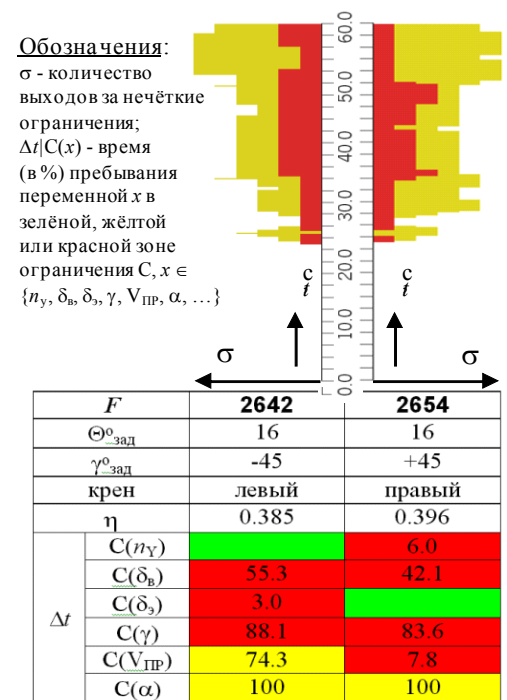


Рис. 9. Влияние аэродинамической асимметрии ЛА на сложность ситуации (генотип $\Gamma(\Phi_1 \times \Phi_2)$, $\gamma_{зад} \in \{-45^\circ, +45^\circ\}$, $\theta_{зад} = 16^\circ$)

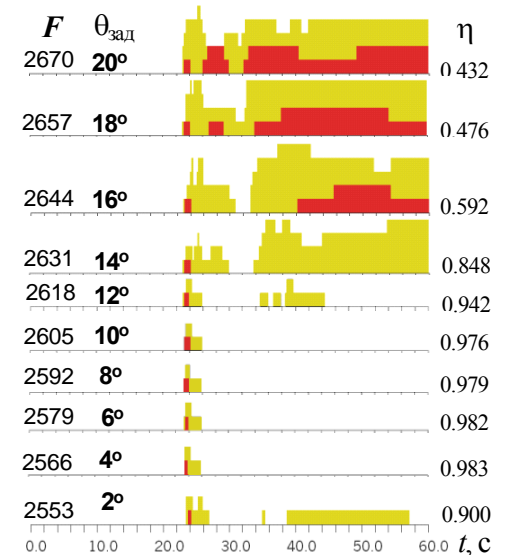
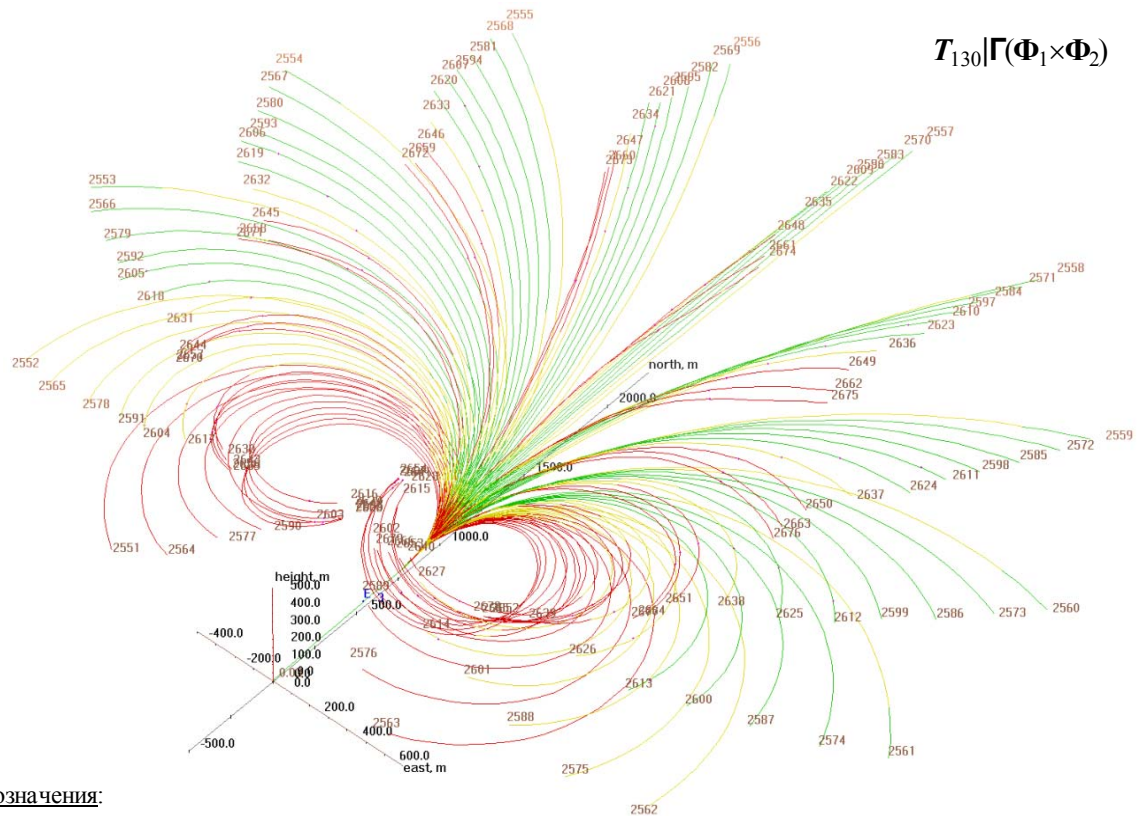


Рис. 10. Диаграммы изменения сложности ситуации (взлёт нормальный и начальный набор высоты, генотип $\Gamma(\Phi_1 \times \Phi_2)$, $\theta_{зад} = var$, $\gamma_{зад} = -30^\circ$)

множеств $\Omega(\theta_{\text{зад}})$ и $\Omega(\gamma_{\text{зад}})$. Окраска дерева соответствует интегральным спектрам БП составляющих его ветвей-“полётов” F_k ; коды k указаны на концах ветвей.



Обозначения:

$T_{130} = \{F_{2551}, \dots, F_{2680}\}$ – ситуационное дерево, F_k – “полёт”; B_i – ветвь, $B_i \equiv F_k, k=2551, \dots, 2680, i=1, \dots, N(T_{130}), N(T_{130})=130$ – количество ветвей в T_{130} ; $\Gamma(\Phi_1 \times \Phi_2)$ – генотип или эксплуатационная гипотеза, реализованная в T_{130} ; $\Gamma(\Phi_1 \times \Phi_2) = \Omega(\Phi_1) \times \Omega(\Phi_2)$; Φ_1 – ЭФ “заданный угол наклона траектории”, $\Phi_1 \equiv \theta_{\text{зад}}, \Omega(\Phi_1) = \{2^\circ, 4^\circ, \dots, 20^\circ\}$; Φ_2 – ЭФ “заданный угол крена”, $\Phi_2 \equiv \gamma_{\text{зад}}, \Omega(\Phi_2) = \{-45^\circ, -37.5^\circ, \dots, +45^\circ\}$; $\Delta t(B_i)$ – длина ветви по $t, (\forall i) (i=1, \dots, N(T_{130})) (\Delta t(B_i) = 60 \text{ c})$; (north, east, height) $\equiv (N, E, H)$ – координатные осиграфика T_{130} (нормальная система).

Рис. 11. Ситуационное дерево T_{130} : “Взлёт нормальный и начальный набор высоты. Вариации/ошибки выдерживания $\theta_{\text{зад}}$ и $\gamma_{\text{зад}}, \theta_{\text{зад}} \in \{2^\circ, \dots, 20^\circ\}, \gamma_{\text{зад}} \in \{-45^\circ, \dots, +45^\circ\}$ ”

Из данных рис. 11 видно, что понятие ситуационного дерева позволяет интегрально представить семейство родственных “полётов” в заданных координатах, отразить влияние вариаций сценария и ЭФ на положение траекторий и уровень БП. Для анализа логики полёта дополнительно могут использоваться распознанные события из календаря $\Omega(E)$ в привязке к ветвям ситуационного дерева.

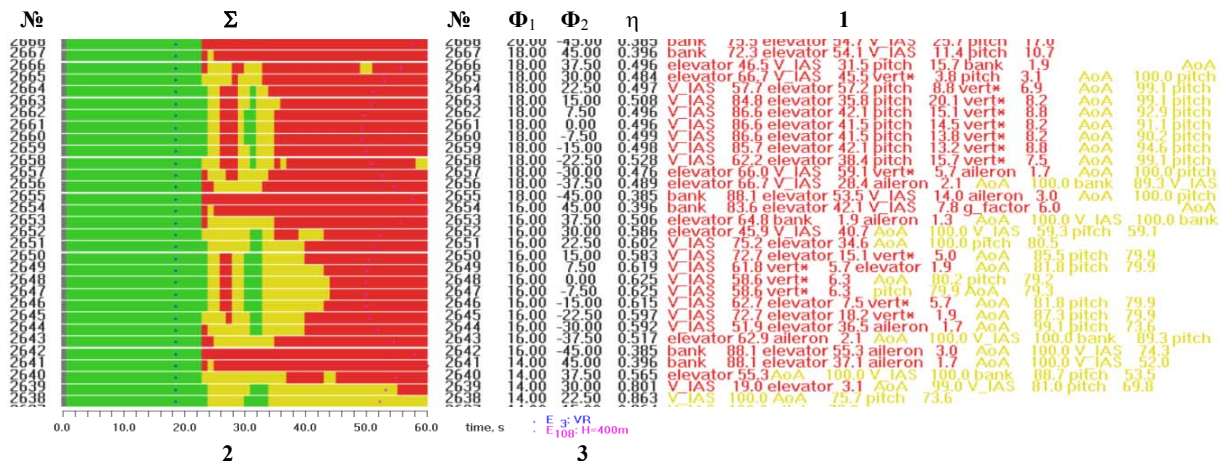
“Виртуальный налёт” T , аккумулированный в ситуационном дереве T для эксплуатационной гипотезы Γ , вычисляется по формуле: $T|\Gamma = \sum_{i=1}^{N(T)} \Delta t(B_i) \cdot 3600^{-1} [\text{час}]$, где

$N(T)$ – количество ветвей-“полётов”, представленных в T , $\Delta t(B_i)$ – длина ветви B_i в секундах полёта, $i = 1, \dots, N(T)$. Например, для дерева T_{130} и гипотезы $\Gamma(\Phi_1 \times \Phi_2)$ имеем: $T|\Gamma(\Phi_1 \times \Phi_2) = N(T_{130}) \cdot \Delta t \equiv 130 \times 60 / 3600 \approx 2.2 \text{ час}$, где $\Delta t = \Delta t(B_i) = \text{const} \equiv 60 \text{ c}$.

Сравнение показателей Γ и T двух операторов (например, лётчика и автомата), может использоваться, в частности, для юридического обоснования процедуры автоматической передачи права управления ЛА в нештатной ситуации наиболее компетентному из них, начиная с “точки возврата” t_{\uparrow} , т.е. если в результате прогноза по T распознана угроза неуправляемого развития “цепной реакции” катастрофы. Эта дилемма возникнет при создании и эксплуатации перспективных бортовых искусственно-

интеллектуальных систем “встроенной” безопасности полёта, в том числе для блокирования преднамеренных катастроф типа 11 сентября 2001 года.

На **рис. 12** показан фрагмент формата, объединяющего структурную, качественную и количественную информацию о безопасности “полётов”, из дерева T_{130} : интегральные спектры БП, характерные события, значения исследуемых ЭФ, индексы БП. Справа от спектров выводятся сообщения о фактах, степени и длительности нарушения ограничений в каждом из “полётов”. Существенно, что данный формат генерируется автоматически с



Обозначения:

№ - код “полёта” из T_{130} ; Σ - интегральный СБП; Φ_1 - значение ЭФ $\theta_{зад}$; Φ_2 - значение ЭФ $\gamma_{зад}$; η - оценка (индекс) БП; 1 – сообщения о нарушениях нечётких ограничений; 2 – единая шкала времени “полётов”; 3 – характерные события, отображаемые на интегральных СБП.

Рис. 12. Интегральные спектры БП, испытанные уровни ЭФ, индексы БП и статистика нарушений нечётких ограничений для “полётов” из дерева T_{130} (фрагмент)

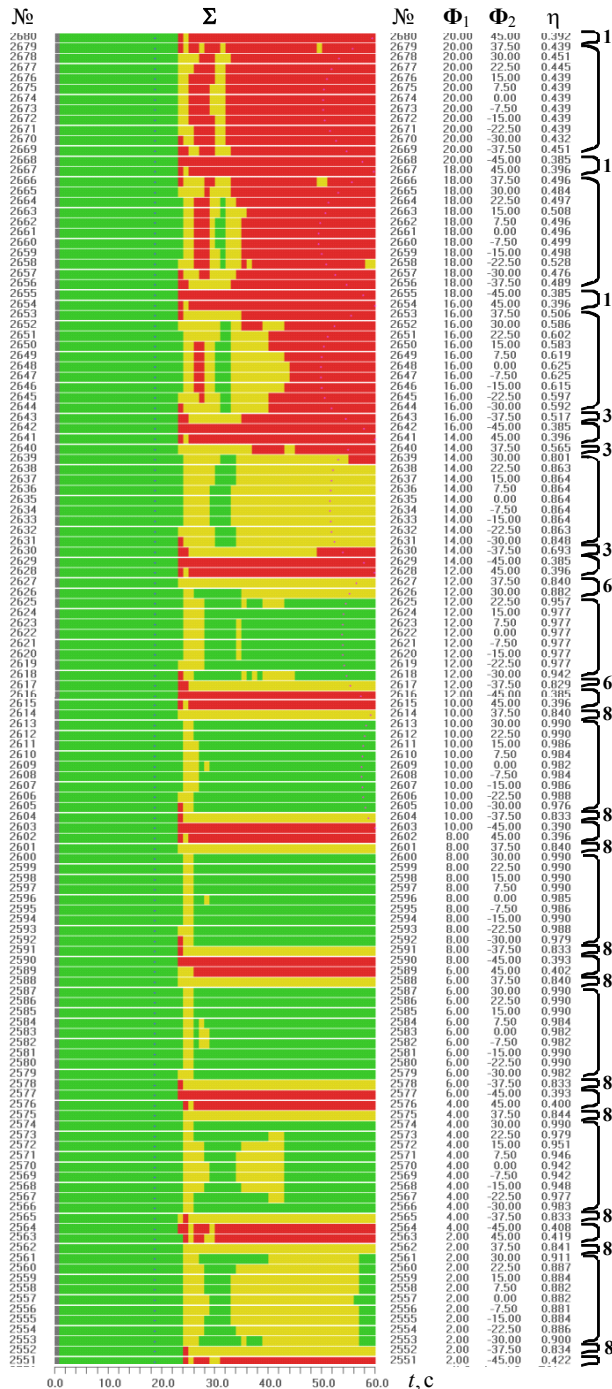
помощью ПМК VATES и отражает *причинно-следственный механизм влияния комплекса ЭФ на безопасность полёта.*

На **рис. 13** представлено семейство интегральных спектров БП всех “полётов” из T_{130} . Экспресс-анализ спектров дается ниже. Цель анализа – выявить “*топологию безопасности*” нестандартных вариантов взлёта, представленных в T_{130} , показать зависимость между значениями факторов Φ_1 и Φ_2 , с одной стороны, и видом и степенью нарушения ограничений, с другой. Цифрами от 1 до 9 на рисунке обозначены характерные случаи (группы “полётов”), отличающиеся причинно-следственными отношениями БП.

Случай 1 – это длительные красные пики выхода системы за ограничения по γ в сочетании с прогрессирующим, по мере роста θ , выходом за ограничение по δ_b ; 2 – взаимосвязанные парные нарушения ограничений $V_{ПР} \leftrightarrow \delta_b$ и др., либо приближения к парам ограничений $\alpha \leftrightarrow \vartheta$ и др.; 3 – красные пики, обусловленные предельными значениями δ_b ; 4 – приближение к ограничениям “ $V_{ПР}$ мала” и “большой угол тангажа”; 5 – красные пики, связанные с выходом на ограничение по γ ; 6 – близость к ограничению по γ и/или $V_{ПР}$; 7 – это безопасные сценарии в рамках гипотезы $\Gamma(\Phi_1 \times \Phi_2)$; 8 – жёлтые пики, вызванные приближением состояния к ограничению по γ ; 9 – полёты, в основном, в жёлтой зоне у ограничения “малый градиент набора высоты”.

На **рис. 14** показан фрагмент семейства интегральных спектров БП другого ситуационного дерева, имеющего генотип $\Gamma(\Phi_3 \times \Phi_4)$: “Взлёт, отказ левого двигателя на скорости V_{LEO} (Φ_3), боковой ветер W_{zg} (Φ_4), где $\Omega(\Phi_3) = \{115, 130, \dots, 205\}$ [км/ч], $\Omega(\Phi_4) = \{-18, -15, \dots, +18\}$ [м/с]”, $k = 10^{-1}$. Анализируя эти спектры, можно, в частности, оценить влияние факторов V_{LEO} и W_{zg} на безопасность взлёта и положение событий (E_3, E_7), определить критические сочетания V_{LEO} и W_{zg} , а также оценить положение “оврагов” в топологии безопасности для любого заданного ситуационного дерева.

Таким образом, разработанный метод позволяет проводить поточный экспресс-анализ безопасности полёта, количественно оценивать её уровень, выявлять особенности и аномалии в поведении системы как бы с “высоты птичьего полёта”, определять критические сочетания гетерогенных ЭФ, изучать “топологию безопасности” и причинно-следственный механизм зарождения и развития катастрофических ситуаций для широкого класса реалистичных условий эксплуатации.



Обозначения:
 $\Sigma, \text{№}, \Phi_1, \Phi_2, \eta$ - см. рис. 12; 1, 2, ..., 9 – характерные случаи-подмножества сценариев (см. пояснения в тексте)

Рис. 13. Семейство интегральных спектров БП и его характерные подмножества для ситуационного дерева T_{130}

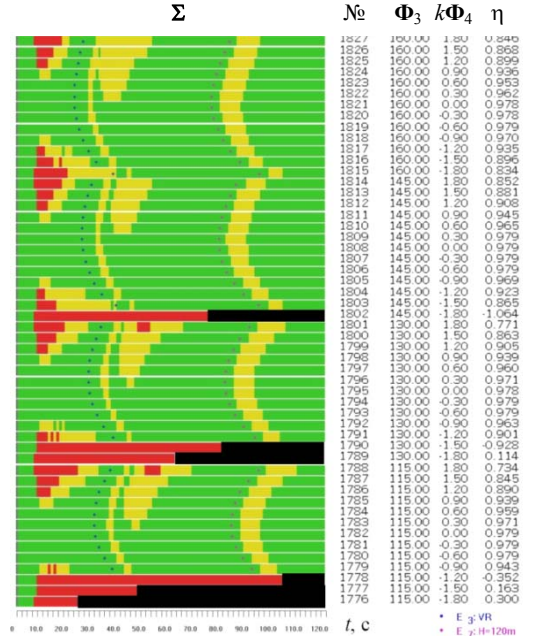
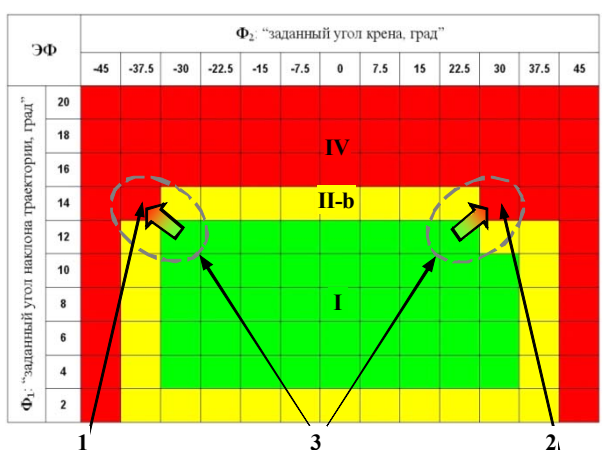


Рис. 14. Семейство интегральных СБП СД, генотип $\Gamma(\Phi_3 \times \Phi_4)$: “Взлёт: отказ левого двигателя на скорости $V_{LEO}(\Phi_3)$ и боковой ветер $W_{zg}(\Phi_4)$, $\Omega(\Phi_3) = \{115, \dots, 205\}$ [км/ч], $\Omega(\Phi_4) = \{-18, \dots, +18\}$ [м/с]”, $k = 10^{-1}$ (фрагмент)



Обозначения:
 1, 2 - опасные “углы” окна БП: $(\Theta, \gamma) \in (14^\circ, -37.5^\circ)$ или $(\Theta, \gamma) \in (14^\circ, +30^\circ \dots +37.5^\circ)$. 3 - возможность быстрого перехода \rightarrow из безопасного режима (категория I) в опасный (категория IV), минуя промежуточные режимы (категории II, III).

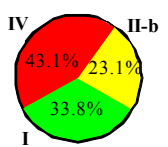


Рис. 15. Окно безопасности полёта и распределение “полётов” по категориям безопасности (ситуационное дерево T_{130})

В табл. 1 определены пять категорий безопасности полётных ситуаций [5]: безопасные (I), условно-безопасные (II), потенциально опасные (III), опасные (запрещённые) (IV) и катастрофические (ситуации типа “цепная реакция”) (V). Данная шкала позволяет автоматизировать задачу разбиения любого ситуационного дерева или множества родственных ситуаций на кластеры равной безопасности на основе анализа их интегральных спектров (табл. 2).

Категории безопасности полёта

Таблица 1

Категория и подкатегория БП			Критерий классификации ситуаций (сценариев)
Цвет	Код	Название	
	I	Безопасные	Допускается приближение состояния системы к ограничениям без их нарушения, т.е. <i>кратковременное</i> пребывание состояния в жёлтой зоне с последующим её покиданием к концу ситуации
	II-a	Условно-безопасные, а	Допускается <i>временное</i> пребывание состояния системы у ограничений, т.е. в жёлтой зоне
	II-b	Условно-безопасные, b	Допускается <i>длительное</i> пребывание состояния системы у ограничений, т.е. в жёлтой зоне
	III	Потенциально Опасные	Наблюдается <i>кратковременное</i> нарушение ограничений, т.е. нахождение состояния системы в красной зоне с последующим её покиданием к концу ситуации
	IV	Опасные (запрещённые)	Наблюдается нарушение ограничений, т.е. <i>длительное</i> нахождение состояния системы в красной зоне, либо состояние системы остаётся в ней <i>до конца ситуации</i>
	V	Катастрофические (“цепная реакция”)	Хотя бы одно ограничение нарушено с <i>катастрофическими</i> последствиями, т.е. состояние системы переходит в чёрную зону

Классификация “полётов” из T_{130} по уровню безопасности

Таблица 2

Категория сценариев	№№ “полётов” (всего 130)	%
Безопасные (I)	2566-2574, 2579-2587, 2592-2600, 2605-2613, 2618-2625 (44 “полёта”)	33.8
Условно-безопасные (II-b)	2552-2562, 2565, 2575, 2578, 2588, 2591, 2601, 2604, 2614, 2617, 2626, 2627, 2631-2638 (30 “полётов”)	23.1
Опасные (запрещённые) (IV)	2551, 2563, 2564, 2576-2577, 2589-2590, 2602-2603, 2615-2616, 2628-2630, 2639-2680 (56 “полётов”)	43.1

Из данных табл. 2 видно, что “полёты”, представляющие категории III и V, в дереве T_{130} отсутствуют. Пустой кластер для категории III может означать следующее: (1) в аэродинамической компоновке или в сценарии управления ЛА имеются недостатки, провоцирующие резкий переход системы из безопасного состояния в опасное, либо (2) необходимо уточнить генотип ситуационного дерева для более тщательного изучения этой промежуточной области состояний.

На рис. 15 представлены рекомендации по пилотированию перспективного самолёта МВЛ для условий эксплуатационной гипотезы $\Gamma(\Phi_1 \times \Phi_2)$, оформленные в виде “окна безопасности полёта” – концепции НАСА [5], доработанной и реализованной автором в ПМК VATES.

Окна безопасности строятся автоматически в заданных координатах, выбираемых в зависимости от эксплуатационной гипотезы и этапа полёта, в данном случае в координатах $(\theta_{зад}, \gamma_{зад})$. Для этого используется алгоритм из табл. 1 и информация интегральных спектров БП изучаемых “полётов”, в данном примере ситуаций из дерева T_{130} (см. рис. 11, 13).

Цифрами 1, 2 на рисунке отмечены два опасных “угла” окна безопасности. В этих углах возможен более быстрый, по сравнению с другими зонами данного окна, переход 3 состояний системы из безопасной категории в опасную категорию (I→IV), минуя промежуточные категории II и III. В состояниях с $(\theta, \gamma) \cong (14^\circ, -37.5^\circ)$ или $(\theta, \gamma) \in (14^\circ, +30^\circ)$

... +37.5°) не исключен также дальнейший переход $IV \rightarrow V$, т.е. развитие ситуации типа “цепная реакция”. Поэтому полёт в нестандартных ситуациях, соответствующих “углам” *1* и *2*, требует от оператора повышенного внимания и аккуратного пилотирования. Асимметрия окна БП (θ, γ) по γ в зонах *1, 2* обусловлена кривой обдувкой от винтов двигателей, что характерно для аэродинамической компоновки самолёта данного типа. Видно, что метод позволяет отразить влияние особенностей аэродинамики ЛА на уровне рекомендаций по управлению.

Заключение. Представлен системный подход к изучению безопасности полёта ЛА в сложных (многофакторных) полётных ситуациях на основе метода и технологии ситуационного моделирования. Подход реализован в авторском программно-моделирующем комплексе VATES. Данный комплекс позволяет моделировать, отображать, анализировать и количественно оценивать на ПЭВМ различные нестандартные сценарии, которые представляют практический интерес с позиций изучения физики и логики развития сложных (многофакторных) ситуаций, в том числе катастрофических ситуаций типа “цепная реакция”.

Новая методология может использоваться при решении задач формирования и уточнения “внутренней модели полёта” лётчика, выявления особенностей и аномалий в поведении системы “оператор (лётчик, автомат) – ЛА – эксплуатационная среда” в многофакторных ситуациях и вблизи лётных ограничений, прогнозирования раздельного и комплексного влияния разнородных эксплуатационных факторов на безопасность полёта и эффективность применения ЛА в вычислительном эксперименте типа “что ..., если ...?” на ПЭВМ, выявления “предвестников” лётных происшествий.

Следует, однако, иметь в виду, что для получения значимых результатов на выходе автономной ситуационной модели полёта (ПМК VATES) необходимо иметь полное “параметрическое определение” объекта, включая банк данных аэродинамики и других исходных характеристик ЛА или проекта, для всего исследуемого диапазона режимов и условий полёта.

Список использованных источников:

1. Burdun, I.Y., 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 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, USA* (P-355), SAE, USA, 2000, pp. 75-92.
3. Quartz, Steven R., and Sejnowski, Terrence J., “The Neural Basis of Cognitive Development: A Constructivist Manifesto”, *Behavioral & Brain Sciences*, 19__, 49 pp.
4. Амирьянц Г.А., “Лётчики-испытатели”, М., Машиностроение, 1997г., 400 с.
5. Бурдун И.Е., “Прогнозирование безопасности полёта летательного аппарата в сложных ситуациях”, *XIV Школа-семинар ЦАГИ “Аэродинамика летательных аппаратов”*, 27-28 февраля 2003г., п.Володарского, ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, 2003г. 22 с. (слайды доклада).
6. 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 and Exhibition, April 6-8, 1998, Daytona Beach, FL, USA* (P-321), SAE, USA, 1998, pp. 131-144.