

УДК 681.51.01(035.5)

## СИТУАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Н. И. ЮСУПОВА

Факультет информатики и робототехники УГАТУ  
Тел: (3472) 23 77 17 E-mail: Nafisa@ugatu.ac.ru

Рассматриваются вопросы обеспечения помехоустойчивости ситуационного управления сложными техническими объектами в условиях неопределенности, обусловленной действием помех и возможностью возникновения критических ситуаций. Выделяются задачи анализа и принятия решений в изолированных ситуациях и в условиях ситуационного взаимодействия. Обсуждаются подходы к их решению, эффективность которых подтверждается результатами компьютерного моделирования

*Ситуационное управление; критические ситуации; влияние помех; принятие решений; моделирование на ЭВМ процессов управления*

### ВВЕДЕНИЕ

Управление сложными техническими объектами (СТО), которые включают несколько подсистем, множество компонентов и большое число элементов, функционируют в разнообразных внешних условиях и физических средах и выполняют при этом многочисленные задачи, является сложной проблемой с позиций как разработки управляющей системы, так и реализации процесса управления. К подобному классу СТО относятся самолеты и другие летательные аппараты (ЛА) различного назначения, космические аппараты многоцелевого пользования, многоцелевые автономные мобильные роботы, робототехнические системы и др.

Дополнительные сложности появляются при управлении указанными объектами в условиях критических ситуаций (КС), возникающих в результате различных нарушений (отказов оборудования, ошибок экипажа и персонала, опасных возмущений среды) и требующих своевременных и правильных управленческих решений для предотвращения катастрофических, аварийных или иных нежелательных последствий. Для рассматриваемого класса СТО стоимость потерь в случае аварии или другого нежелательного исхода КС может быть чрезвычайно большой.

Упомянутые сложности делают недостаточно эффективными традиционные подходы к управлению СТО. В последнее десятилетие за рубежом [1] и у нас в стране [2–4] ведутся успешные разработки в области систем управления, использующих методы и средства искусственного интеллекта, в частности, нейронные сети, нечеткую логику и т. п. В уфимской научной школе автоматического управления также развивались различные подходы к управлению СТО в критических, аварийных, нештатных режимах, такие, как ситуационный, надежностный, робастный [4, 5].

Автор относит себя к сторонникам ситуационного подхода к управлению СТО, основанного на обнаружении ситуаций из заранее определенного множества и принятии управленческих решений, ассоциированных с ситуациями. Ситуационный подход используется в системах управления различного назначения сам по себе и может служить основой для применения других методов искусственного интеллекта [2, 6].

Реальный процесс управления сопровождается помехами, порождающими неопределенность, что особенно характерно для критических ситуаций. Действие помех при ситуационном управлении приводит к ошибкам обнаружения ситуаций и, как следствие,



Рис. 1. К проблеме ситуационного управления

к ошибкам принятия управленческих решений, имеющим серьезные последствия для безопасности и качества функционирования СТО. Поэтому актуальной проблемой является обеспечение помехоустойчивости ситуационного управления СТО.

В данной статье обсуждаются концептуальные и теоретические аспекты этой проблемы, рассматриваются в обобщенном виде результаты длительных исследований автора в этой области.

### 1. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ

Один из подходов к решению рассматриваемой проблемы связан с традиционными методами обнаружения и анализа сигналов на фоне помех. Этот путь основан на том допущении, что управленческие ситуации и их последовательная смена в процессе управления могут рассматриваться как случайные события и случайные процессы. Анализ сущности управленческой ситуации вообще и критической ситуации в частности показывает, что это сложные объекты, поэтому непосредственное применение к ним традиционных методов не всегда дает желаемые результаты. В частности, в КС необходимо учитывать резерв времени, что приводит к дополнительным ограничениям на время анализа. Другие трудности связаны с необходимостью учета возможных переходов ситуаций (ситуационного взаимодействия) в условиях неопределенности, порождаемой помехами.

Таким образом, в проблеме можно выделить два аспекта ситуационного анализа и принятия решений:

- в изолированных ситуациях;

- при межситуационном взаимодействии.

Особенности ситуационного управления (рис. 1) определяются причинами, последствиями, решениями и резервом времени в КС в условиях неопределенности, порождаемой помехами.

В условиях помех невозможно обеспечить точное соответствие субъективной оценки объективной ситуации. Субъект управления должен оценивать объективную ситуацию так, чтобы несоответствие не приводило к нежелательным последствиям.

Автором приняты следующие концептуальные допущения:

- о *переключательном характере управления и возмущения*, предполагающее, что возникновение КС можно рассматривать как переключение стратегии возмущения, а управленческое решение — как ответное переключение стратегии управления;
- о *потенциальной управляемости*, предполагающее, что при отсутствии помех субъект управления обеспечивает достижение цели из допустимых начальных ситуаций;
- об *устраняемой неопределенности*, предполагающее, что имеются такие процедуры анализа, которые с течением времени уменьшают неопределенность до приемлемого уровня;
- о *прогнозируемости развития ситуации*, предполагающее, что можно достаточно точно оценить резерв времени для различных гипотез об объективных ситуациях.



Рис. 2. Процедура принятия решений в изолированных КС

Задача анализа изолированной ситуации рассматривается как задача обнаружения перехода СТО из нормальной ситуации в КС в результате внешнего изменения стратегии управления, стратегии возмущения, состояния или/и времени. Принятие решения состоит в ответном изменении стратегии управления для перевода КС в безопасную ситуацию, из которой достигается цель управления.

Возможна модель устраняемой неопределенности, в которой причины КС и наблюдаемые признаки их появления подчиняются вероятностным закономерностям. Возможности методов последовательного анализа для оценивания достоверности гипотез о возникновении КС ограничены длительностью последовательного анализа, определяемой границами резерва времени.

Для формализации задачи анализа КС и принятия решений введены понятия: процедуры выдвижения гипотезы, задаваемой предикатом  $h_{sk} = h_{sk}(x_t)$  для исходной ситуации  $s$ , ситуации перехода  $k$  и наблюдаемых параметров  $x_t$ ; гипотезы  $H_{sk}$  о переходе в ситуацию  $k$ ; множества текущих гипотез переходов  $\mathcal{H}_s = \{H_{sk}\}$ ; процедуры анализа достоверности  $f_{sk}$ , накапливающей во времени достаточные статистики

$$\lambda_{sk}(t) = f_{sk}(\lambda_{sk}(t-1), x_t),$$

где моменты  $t$  и  $(t-1)$  соответствуют текущему и предыдущему шагам анализа.

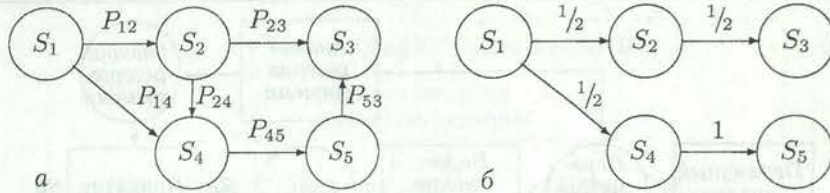
На основе введенных понятий можно рассмотреть концептуальные аспекты принятия решения в условиях ограниченного резерва

времени. В предположении справедливости  $H_{sk}$  для каждой из стратегий  $v_1, \dots, v_n$  можно оценить условный резерв времени  $\tau_{sk}(v_1), \dots, \tau_{sk}(v_n)$ . Величина  $\tau_{sk}(v_i)$  представляет собой оценку будущего времени, в течение которого система управления может оставаться в ситуации  $k$ , сохраняя возможность достижения цели управления с помощью стратегии  $v_i$ . Совмещая эти оценки, получаем разбиение будущего времени на интервалы, допускающие те или иные комбинации стратегий. При принятии решения на границе интервалов необходим выбор между недостоверным решением и невозможностью воспользоваться в будущем теми или иными стратегиями. При нулевом резерве времени решение принимается обязательно для любых допустимых стратегий.

Идея предлагаемой концепции принятия решений поясняется на рис. 2.

Модели ситуационного взаимодействия (в том числе иерархические), отслеживающие переходы объективных ситуаций, разрабатываются для использования в базе знаний системы управления. Влияние помех на процесс интерпретации таких моделей выражается в возможных пропусках или ошибочных переходах субъективных ситуаций, приводящих к использованию ошибочных стратегий управления.

Традиционные подходы к обеспечению помехоустойчивости в ситуационных моделях основаны на временном (в том числе последовательном) анализе переходов ситуаций. Введение временной обработки приводит к необоснованной задержке обнаружения транзитных переходов ситуаций, когда



**Рис. 3.** К понятию многошаговой гипотезы переходов: а — исходная ситуационная модель; б — многошаговая гипотеза для текущей ситуации  $S_1$  при пассивных переходах  $P_{24}$  и  $P_{53}$ , активном  $P_{45}$  и гипотетически активных остальных

вслед за переходом, например из ситуации  $A$  в ситуацию  $B$ , следует переход в ситуацию  $C$ . Время обнаружения транзитного перехода  $A \rightarrow B \rightarrow C$  составит  $\tau_{ABC} = \tau_{AB} + \tau_{BC}$ , где  $\tau_{AB}$  и  $\tau_{BC}$  — время обнаружения переходов  $A \rightarrow B$  и  $B \rightarrow C$ , в то время как объективно для этого достаточно  $\tau = \max(\tau_{AB}, \tau_{BC})$ .

Для преодоления указанной трудности и обеспечения помехоустойчивости при интерпретации ситуационных моделей предлагается концепция многошаговых гипотез.

Введенное понятие многошаговой гипотезы отражает все возможные переходы из текущей ситуации ( $S_1$  на рис. 3) с учетом гипотетически активных переходов, для которых еще не закончен временной анализ и пока не принято решение (переходы  $P_{12}$ ,  $P_{23}$ ,  $P_{14}$  на рис. 3).

Контроль многошаговых гипотез позволяет организовать упреждающий временной анализ одновременно для всех возможных переходов изолированных субъективных ситуаций, соответствующих ожидаемым переходам объективных ситуаций, что обеспечивает сокращение суммарного времени принятия решений.

## 2. АНАЛИЗ ИЗОЛИРОВАННЫХ СИТУАЦИЙ И ОЦЕНКА РЕЗЕРВА ВРЕМЕНИ

Для изолированных ситуаций в условиях помех разработаны: метод оценивания резерва времени системы управления, метод принятия управленческих решений на основе информации о резерве времени, модели достаточных статистик, используемых при принятии решений [7].

Задача оценивания резерва времени рассматривается как задача оценивания момента достижения системой некоторой границы  $\partial A$  в фазово-временной области. Эта задача разбивается на две подзадачи: построение границ КС  $\partial A$ ; прогнозирование момента достижения границы  $\partial A$ .

Результаты исследования свойств границы КС, полученные с участием автора для стационарной динамической системы без учета помех и со стационарной допустимой областью состояний  $B$ , приведены в работе [8]. В нетривиальных случаях область  $B$  содержит подобласть безвыходных ситуаций и граница КС  $\partial A$  содержит участок, внутренний в  $B$ .

Важный вопрос — влияние помех на оценивание резерва времени и порождаемая ими неопределенность. Для стационарной динамической системы может быть построен модифицированный метод определения границ КС, учитывающий влияние помех [9].

Рассматривается объект управления

$$\dot{x} = f(x, u, w),$$

где  $x$  — состояние;  $u$  — ограниченное управление;  $w$  — помеха. Область допустимых состояний  $B$  — замкнутая и выпуклая. Помеха  $w$  (в общем случае многомерная) — ограниченная и воздействует на объект аналогично управлению  $u$ , но не зависит от субъекта управления.

При построении границы КС учитывается наихудший случай влияния помехи. Для отыскания граничного множества  $X_0 = \partial(\partial B_A)$  исследуется знак скалярного произведения  $\langle n(x) \cdot f(x, u, w) \rangle$ , где  $n(x)$  — вектор внешней единичной нормали границы  $B$  в точке  $x$ , и определяется участок границы КС  $\partial A_B$ , совпадающий с границей области  $B$  для любых значений помехи  $w$ . Для этого отыскивается участок области  $B$ , такой что

$$\max_{w \in W} \langle n(x) \cdot f(x, u, w) \rangle \leq 0.$$

После этого строится участок  $\partial A_D$  границы КС, внутренний в области  $B$ . Найденное граничное множество используется в качестве начальных состояний исходной системы и сопряженной системы с обратным отсчетом времени. Уравнение, определяющее экс-

тремальное управление  $u^*(t)$ , имеет вид

$$\langle \eta(x) \cdot f(x^*(t), u^*(t), w^*(t)) \rangle = \max_{u \in U} \min_{w \in W} \langle \eta(t) \cdot f(x(t), u(t), w(t)) \rangle,$$

где  $w^*(t)$  — экстремальная помеха, т.е. наилучший случай помехи, для которого строится граница КС. Далее отыскивается множество траекторий, соответствующих начальным условиям  $X_0$ , экстремальному управлению, экстремальной помехе, и переходом к прямому отсчету времени строится параметрически заданная внутренняя граница  $\partial A_D$ . Оценивание резерва времени осуществляется на основе прогноза момента первого достижения траектории системы найденных границ КС.

### 3. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ В ИЗОЛИРОВАННОЙ СИТУАЦИИ

Момент возникновения КС рассматривается как случайная величина  $\theta$ . В качестве индикатора смены ситуации введен случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем:  $\xi(t) = \{0, \text{ если } t < \theta, 1 - \text{ в противном случае}\}$ . Для величины  $\theta$  может использоваться пуассоновское априорное распределение [6].

Ставится задача отыскания оптимального момента  $\tau$  переключения стратегии управления в ответ на возникновение КС в момент  $\theta$ .

В качестве модели наблюдаемых явлений, сопутствующих возникновению КС, введен случайный процесс  $\eta(t)$ , который в момент  $\theta$  изменяет свои свойства:

$$\eta(t) = \begin{cases} \eta^0(t), & \text{если } 0 \leq t < \theta, \\ \eta^1(t), & \text{если } \theta \leq t < \infty, \end{cases}$$

где  $(\eta^0(t), 0 \leq t < \theta)$  и  $(\eta^1(t), \theta \leq t < \infty)$  — два случайных процесса с независимымиращениями, распределения которых не зависят от  $\theta$ .

Функция средних потерь (риска) от переключения стратегии управления в момент  $\tau^\delta$  в соответствии с правилом принятия решения  $\delta$  имеет вид

$$R(\tau^\delta, \delta) = C_F P_{ps} \{\tau^\delta < \theta\} + C_1 M^\theta \{\varphi(x_{\tau^\delta}) - \varphi(x_\theta)\} + C_T P_{ps} \{\theta < t^*\},$$

где  $C_F, C_1, C_T$  — коэффициенты;  $P_{ps}\{\cdot\}$  — апостериорная вероятность ложной тревоги;

$M^\theta\{\cdot\}$  — математическое ожидание по апостериорной мере  $\omega_{ps}(\theta)$ ;  $\varphi(x) = \min_{u \in U} Q(x, x_T)$

— скалярное поле потерь, задаваемое в области  $B$  показателем качества терминального управления  $Q(x, x_T)$  при переключении стратегии управления в точке  $x$  и достижении целевого множества в точке  $x_T$ . Тем самым задача обнаружения КС сформулирована в классе статистического последовательного анализа как задача о «разладке» с неаддитивным риском.

Важным является вопрос о конструировании статистик, достаточных для принятия решения в этой задаче. Доказано, что задача сводится к аддитивной при переходе из пространства состояний в поле потерь [7]. В этом случае апостериорная вероятность КС  $P_{ps}\{\theta \leq t\}$  является достаточной статистикой. Оптимальное правило принятия решения  $\delta$  основано на сравнении  $P_{ps}$  с останавливающей границей.

Возникает вопрос определения оптимальной останавливающей границы для апостериорной вероятности КС. В [7] показано, что оптимальная граница удовлетворяет уравнению Беллмана

$$-\frac{\partial R}{\partial s} = r(s|P_{ps}^s) + \frac{\partial R}{\partial P_{ps}^s} M_{ps} \frac{dP_{ps}^s}{ds} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 R}{\partial (P_{ps}^s)^2} b,$$

где  $s = \varphi(x(t))$  — состояние в поле потерь. Отмечено, что останавливающая граница зависит от резерва времени.

Соотношения для вычисления апостериорной вероятности КС применительно к следующей модели наблюдаемого процесса:

$$\eta(s) = \begin{cases} z(s), & \text{если } s < \lambda, \\ h(s - \lambda) + z(s), & \text{если } s \geq \lambda, \end{cases}$$

где  $z(s)$  — марковский процесс с плотностью распределения вероятностей перехода  $v_z\{z(s + \Delta s) | z(s)\}$ ;  $h(\cdot)$  — детерминированная функция, отличная от нуля при неотрицательных значениях аргумента;  $s$  — текущее состояние в поле потерь;  $\lambda$  — состояние в поле потерь возникновения КС, приведены в [7].

В качестве достаточной статистики выступает отношение правдоподобия  $L_s$  гипотез  $H_1$  «смена ситуации уже наступила» и  $H_0$  «смена ситуации еще не наступила», являющегося монотонной функцией апостериорной вероятности КС. Показано, что  $L_s$  удовлетворяет рекуррентному соотношению

$$L_{m+1} = \gamma_{m+1} \alpha_{m+1} A_{m+1}(\eta_{m+1}, \eta_m) L_m + \gamma_{m+1} (\alpha_{m+1} - 1) B_{m+1}(\eta_{m+1}, \eta_m),$$

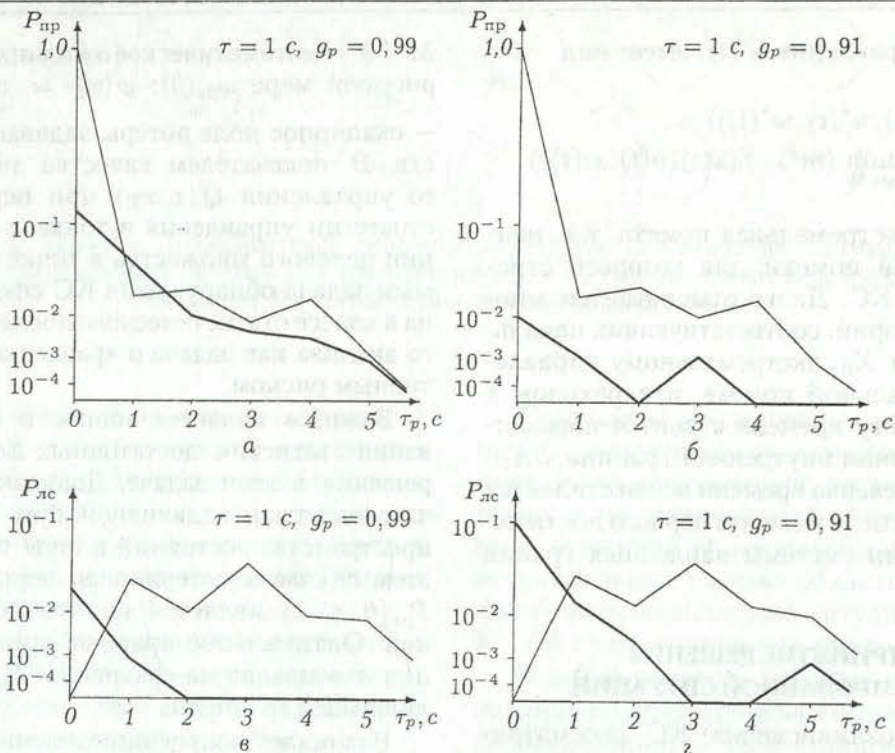


Рис. 4. Результаты статистического моделирования ситуации «Прерванный взлет» (случай равных вероятностей ошибок одного рода): а, в — вероятности пропуска ситуации; б, г — вероятности ложного срабатывания; — известная система; — предлагаемая система

для вычисления коэффициентов которого получены соответствующие формулы. В дальнейшем результаты обобщены для случая, когда функция  $h$  зависит также от вектора случайных параметров с заданной априорной плотностью распределения. Получены расчетные соотношения для случаев, когда помеха  $z$  является винеровским и сложным марковским процессом и для конкретных вариантов сигнала  $h$ .

Возникает задача практического построения порогов принятия решения для отношения правдоподобия, поскольку точное аналитическое выражение для останавливающей границы получить не удастся. В [6] получены формулы для значений границы в момент истечения резерва времени и для моментов с большим резервом времени и предлагаются варианты приближенной аппроксимации границы внутри интервала возможных значений.

Доказано, что при большом отношении «сигнал/шум» отношение правдоподобия определяется уравнением

$$L_n = \tilde{A}_n(\eta_n, \eta_{n-1}) L_{n-1},$$

что позволяет перейти к процедуре последовательного различения гипотез  $H_1$  и  $H_0$ . В

этом случае обнаружение КС основано на накоплении логарифма отношения правдоподобия:

$$l_n = l_{n-1} + \ln \tilde{A}_n.$$

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ В ИЗОЛИРОВАННОЙ СИТУАЦИИ

Компьютерное моделирование ситуационного управления в изолированных КС имеет целью подтвердить работоспособность метода принятия управленческого решения в КС с использованием информации о резерве времени и оценить статистические показатели его эффективности при отсутствии ряда допущений, принятых при теоретическом исследовании. В [10] приведены результаты моделирования на примере КС самолета «Прерванный взлет».

При исследовании динамики системы управления в КС использовались модели объекта (дифференциальные уравнения, описывающие движение ЛА в нормальном и аварийном режимах) и субъекта управления (алгоритмы вычисления резерва времени и переключения стратегий управления: «Взлет продолжать», «Взлет прекратить»).



Рис. 5. Состав помехоустойчивой ИСМ

По результатам моделирования динамики системы в КС сделаны выводы о возможности оценивать резерв времени с приемлемой точностью и предотвращать выход траекторий в запретную область при включении аварийного управления в границах оценок резерва времени.

Для оценивания вероятностных показателей проводилась генерация случайных параметров динамической модели и процессов на ее входе, вычисление показателей при каждом испытании и статистическая обработка показателей после большой серии испытаний. Генерировались шумы в измерениях фазовых координат, отсчеты и параметры наблюдаемого случайного процесса — симптома нарушения. Проводились эксперименты на пропуск КС и ложное срабатывание для предлагаемого и порогово-временного методов обнаружения КС.

Моделирование показало своевременность принятия решений предлагаемым методом — ни в одном из испытаний не зарегистрировано попаданий в безвыходную ситуацию (чего нельзя сказать о порогово-временном методе).

Эксперименты по сравнительной оценке вероятностей ошибок одного рода (пропуска КС  $P_{пр}$  или ложного срабатывания  $P_{лс}$ ) при однопорядковых уровнях ошибок другого рода продемонстрировали существенное (в среднем в 10 раз) повышение достоверности принятия решений при использовании пред-

лагаемого метода (рис. 4), т. е. при однопорядковых уровнях ошибок одного рода в среднем на порядок уменьшаются ошибки другого рода. Расчеты показали, что в рассмотренном примере это приведет к уменьшению общей вероятности аварии, по крайней мере, в 7 раз.

## 5. МОДЕЛЬ СИТУАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Разработанная структура помехоустойчивой иерархической ситуационной модели (ИСМ) [11] включает пять укрупненных объектов: исходную и текущую модели, интерпретатор, наборы предикатов активности и внешних процедур (рис. 5).

Исходная модель составляется разработчиком в форме сети объектов четырех типов: ситуаций, переходов (связывающих пары ситуаций одного уровня), погружений (связывающих ситуацию с внутренней подмоделью), акций (связывающих ситуацию с внешней процедурой). Текущая модель есть подграф исходной модели, динамически формируемый интерпретатором в процессе управления. Интерпретатор представляет собой алгоритм обработки исходной модели, вызывающий соответствующие внешние процедуры (управляющие воздействия на объект) с учетом текущих значений предикатов активности (внешних процедур-функций, вырабаты-

вающих по запросу логический результат для текущих значений параметров управления).

Помехоустойчивость ИСМ обеспечивается в ходе ее интерпретации, для чего в текущей модели предусмотрен учет гипотетических ситуаций. Для контроля гипотетических ситуаций предложена модель нечетких предикатов с тремя возможными значениями: 1 — «да», 0 — «нет»,  $\frac{1}{2}$  — «не знаю», — соответствующими наличию, отсутствию и неопределенности (незаконченности анализа) перехода ситуации.

Выразительные возможности ИСМ проверены в ходе разработки ситуационной модели для исследования процессов управления самолетом в КС «Сваливание», результаты приведены в [12]. Модель включает симулятор, соответствующий движению ЛА вблизи срыва потока на крыле и при его возникновении, контроллер, воспроизводящий управление ЛА на этих режимах, и вспомогательные компоненты для проведения испытаний. Семь подмоделей образуют 3-уровневую иерархию, содержащую 36 ситуаций, 36 переходов, 7 погружений, 16 акций. Из 36 предикатов 4 являются нечеткими.

Результаты моделирования подтвердили способность модели отражать качественные состояния системы управления с разной степенью детализации и абстракции от укрупненных ситуаций на верхнем уровне до динамических процессов на нижнем.

## 6. МЕТОД ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

На основе концепции многошаговых гипотез и нечетких предикатов разработан метод помехоустойчивой интерпретации ИСМ [9]. Используя исходный экземпляр текущей модели (с предыдущего цикла интерпретации) и текущие значения предикатов, интерпретатор строит выходной экземпляр текущей модели (для следующего цикла интерпретации), сопровождая это вызовом ассоциированных внешних процедур.

Предложенная структура интерпретатора ИСМ содержит среду, действия, предикаты и правила интерпретации (рис. 5). Среда включает набор из 4-х указателей и 3-х признаков, задающих текущий шаг и состояние интерпретации (обрабатываемую подмодель, ситуацию, дугу и т. п.). Для сохранения и восстановления среды предусмотрен стек. Действия интерпретации — это набор атомарных операций  $D = \{D_1, \dots, D_{15}\}$ , таких, как  $D_3$ : «Сохранить среду» или  $D_{12}$ : «Установить следу-

ющую дугу в качестве обрабатываемой», — выполнение которых сопровождается изменением текущей модели и (или) среды интерпретации. Предикаты интерпретации — набор атомарных условий  $P = \{P_1 \dots P_6\}$ , таких как  $P_1$ : «Есть дуги для обработки?» или  $P_6$ : «Активная дуга?», — управляющих процессом интерпретации. Правила интерпретации  $R = \{R_1 \dots R_8\}$  задают последовательность выполнения действий  $D$  в зависимости от значений предикатов  $P$ . Например, правило  $R_1$  «Интерпретация ситуации» имеет вид  $R_1 \rightarrow \{D_{12}; \text{if } P_1 \text{ then } R_2\}$ , где  $R_2$  — правило «Интерпретация оставшихся дуг», которое, в свою очередь, имеет вид  $R_2 \rightarrow \{R_3; D_{12}; \text{if } P_1 \text{ then } R_2\}$ , и т. д.

С целью верификации модели исследован процесс помехоустойчивой интерпретации путем пошагового выполнения правил интерпретации для двухуровневой ИСМ. Для заданных значений предикатов строились циклограммы интерпретации, содержащие последовательности применения правил, выполняемых при этом действий и соответствующего изменения среды интерпретации. По циклограмме определялась динамика текущего состояния в форме последовательности графов текущей модели. Результаты, приведенные в [9, 11], свидетельствуют о работоспособности и корректности разработанного метода интерпретации. Продемонстрирована способность интерпретатора учитывать и контролировать гипотетические переходы ситуаций по значениям нечетких предикатов, реализуя метод многошаговых гипотез.

В процессе компьютерного моделирования исследовались поведенческие, временные и вероятностные показатели на примере разработанной в [12, 13] ситуационной модели «Сваливание». В ходе статистических экспериментов генерировались случайные помехи, определялись ситуационные траектории и рассчитывались отдельные показатели, которые затем статистически обрабатывались на множестве испытаний. Оценивались запаздывание в принятии решений, время вывода из КС, потеря высоты, вероятности ложных решений для трех вариантов модели: предлагаемого (с нечеткими последовательными предикатами), компромиссного (с последовательными предикатами) и традиционного (с фиксированным временем анализа).

Результаты экспериментов (рис. 6) свидетельствуют о том, что предлагаемый подход на основе контроля многошаговых гипотез существенно эффективнее по временным показателям. Для примерно одинаковых ве-



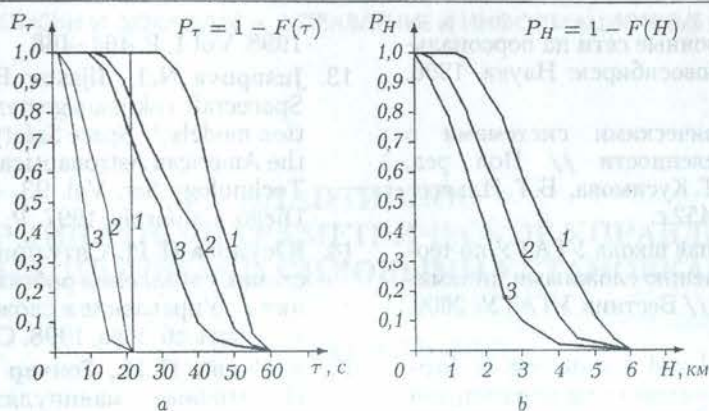


Рис. 6. Оценки распределений в эксперименте «Сваливание»: *a* — для времени вывода (толстые линии) и запаздывания (тонкие линии); *b* — для потери высоты; варианты обнаружителей: 1 — постоянные; 2 — последовательные; 3 — последовательные нечеткие

роятностей ошибок среднее запаздывание в принятии решений у предлагаемого варианта меньше в 1,4 раза, чем у компромиссного, и в 2,4 раза, чем у традиционного. Среднее время вывода из КС меньше в 1,2 и 1,5 раза. Это приводит к уменьшению средней потери высоты в 1,4 и в 1,8 раза. Преимущества метода многошаговых гипотез особенно заметны в экспериментах в условиях ложного сваливания, где зафиксировано уменьшение среднего запаздывания в 3 и 5,5 раза, среднего времени вывода в 1,6 и 1,8 раза и потери высоты в 2 и 4,4 раза.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ особенностей ситуационного анализа и принятия решений для изолированных ситуаций по управлению летательными аппаратами в условиях помех на примерах КС, связанных с отказом двигателя на взлете и при опасном сближении с землей, показал принципиальную работоспособность предложенного подхода.

Рассмотренные особенности ситуационного взаимодействия в условиях помех на примере КС, связанных со сваливанием ЛА, демонстрируют возможность применения результатов к данному классу СТО [13].

Проведенный анализ особенностей ситуационного подхода к управлению робототехнической системой в условиях помех на примерах КС, связанных с предотвращением столкновений манипуляционно-транспортных систем с опасными объектами, показал принципиальную работоспособность предложенного подхода.

Рассмотренные особенности ситуационного взаимодействия и иерархии ситуаций [14–

16], связанных с управлением манипуляционно-транспортной системой на основных этапах ее функционирования, а также автономным мобильным роботом в опасной зоне, демонстрируют возможность применения подхода к данному классу СТО. Проведенный анализ особенностей ситуационного подхода к управлению автономным мобильным роботом в помещении с химическим заражением на примере КС, связанной с предотвращением гибели робота вследствие химического загрязнения, показал принципиальную работоспособность предложенного подхода.

Дальнейшее развитие разработанного подхода к обеспечению помехоустойчивости ситуационного управления СТО в условиях помех и КС в концептуальном плане связано с учетом промежуточных решений в ходе анализа ситуации и ситуационного взаимодействия при принятии ошибочных решений; в теоретическом — с распространением подхода на другие модели устраняемой неопределенности и на другие дискретно-событийные модели, а также с учетом корреляции оценок неопределенности и резерва времени; в прикладном — с созданием лингвистического обеспечения ситуационных моделей четвертого поколения, переносом их на другие платформы и созданием CASE-средств их разработки, внедрения и модификации [17].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В. И. Искусственный интеллект в системах управления и обработки информации // Вестник УГАТУ. 2000. № 1. С. 131–138.
2. Искусственный интеллект: В 3-х кн.: Кн. 2. Модели и методы: Справочник / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. 304 с.

3. **Горбань А. Н.** Нейронные сети на персональном компьютере. Новосибирск: Наука, 1996. 285 с.
4. **Управление** динамическими системами в условиях неопределенности // Под ред. В. И. Васильева, С. Т. Кусимова, Б. Г. Ильясова. М.: Наука, 1998. 452 с.
5. **Ильясов Б. Г.** Научная школа УГАТУ по теории систем и управлению сложными динамическими объектами // Вестник УГАТУ. 2000. № 1. С. 13–20.
6. **Vernadat F.** Control and monitoring of complex manufacturing systems using situation and casual knowledge // Proc. of the 1st Conf. Artificial Intelligence and Expert Systems in Manufacturing. IFS, 1990. P. 271–280.
7. **Юсупова Н. И.** Критические ситуации и принятие решений при управлении в условиях помех. Уфа: Гилем, 1997. 112 с.
8. **Jusupova N. I., Mironov V. V.** User and application system decision coordination and intelligent control in critical situations // Proc. of the IFIP 13th World Computer Congress. Hamburg, Germany, 1994. Vol. 3. P. 376–381.
9. **Yussupova N. I., Mironov V. V.** An advanced situational approach for complex technical objects control in conditions of noises // Intelligent Autonomous Systems: Int. Scient. Issue. Ufa-Karlsruhe: USATU, 1998. P. 200–205.
10. **Jusupova N. I., Pjasov B. G., Mironov V. V.** Spacecraft risk management using critical situation models // 46th Int. Astronautical Congr. Oslo, Norway, 1995. Preprint. IAF. P. 1–9.
11. **Юсупова Н. И., Миронов В. В., Сметанина О. Н.** Помехоустойчивая интерпретация иерархических ситуационных моделей // Интеллектуальные автономные системы: Междунар. науч. изд-е. Уфа-Карлсруэ, 1996. С. 33–47.
12. **Yussupova N. I., Mironov V. V., Smetanina O. N.** Noise-resistant hierarchical situational model for large scale system control in uncertainty // Large Scale Systems: Theory and Application: Preprints of 8th IFAC / IFORS / IMACS / IFIP Symp. Rio Patras, Greece, July 1998. Vol 1. P. 464–468.
13. **Jusupova N. I., Pjasov B. G., Mironov V. V.** Spacecraft risk management using critical situation models // Space Safety and Rescue: Publ. of the American Astronautical Society. Science and Technology Ser. Vol. 93. Ed. G. W. Heath. San Diego, California, 1997. P. 125–137.
14. **Юсупова Н. И.** Ситуационные аспекты в системах управления роботами третьего поколения // Управление в сложных системах: Межвуз. науч. сб. Уфа, 1998. С. 99–108.
15. **Юсупова Н. И., Гончар Л. Е., Рембольд У.** Избыточные манипуляторы. Управление. Планирование траекторий: Препринт. Уфа: УНЦ РАН, 1998. 48 с.
16. **Yussupova N. I., Gonchar L. E., Rembold U.** Path planning algorithm for a lot of mobil autonomous objects in unknown constrained environment // 16th IAARC/IFAC/IEEE Int. Symp. on Automation and Robotics in Construction (ISARC'99). Sept. 22–24, 1999. Madrid, Spain, 1999. P. 403–407.
17. **Yussupova N. I., Mironov V. V., Gonchar L. E.** Hierarchical situational models and linguistic means their realization // Proc. of World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics and 5th Int. Conf. on Information Systems Analysis and Synthesis. Vol. 7. July 31 – Aug 4, 1999. Orlando, Florida. P. 233–236.

#### ОБ АВТОРЕ

**Юсупова Нафиса Исламовна**, профессор, зав. кафедрой выч. математики и кибернетики, декан ф-та информатики и робототехники УГАТУ. Дипл. радиофизик (Воронежский гос. ун-т, 1975), д-р техн. наук в области управления техническими системами (УГАТУ, 1998). Исследования по ситуационному управлению сложными объектами.

