

УДК 629.7.072.4

## УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПОЛЕТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ОЦЕНОК РИСКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕШТАТНЫХ УСЛОВИЙ ПОЛЕТОВ

Е.А. КУКЛЕВ

В статье рассматриваются методы прогнозирования уровня безопасности эксплуатации авиационных систем на основе методов оценивания рисков возникновения негативных ситуаций вследствие потери функциональных свойств системы при критических нарушениях штатных режимов полета воздушных судов (ВС). Предлагается новая трактовка понятия «риска» в виде «меры опасности», что позволяет решать проблему «редких событий» в классе подходов Fuzzy Sets – без использования вероятностных показателей событий. Оценивание уровня безопасности и качества и управления полетов ВС производится не только с позиций надежности (качества и потребительских свойств), но и с позиций ИКАО на основе риск-ориентированного подхода [1]. По ИКАО оценивание уровня безопасности производится путем сравнения расчетного риска с приемлемым уровнем [1]. Такой подход обосновывает применение экспертных методов оценки безопасности в формах проактивного, прогнозного и предиктивного управления рисками возникновения негативных последствий в авиационной деятельности различных видов, включая космическую сферу и атомную энергетику. Однако для таких событий, как аварии и катастрофы, происшедшие с авиационной техникой, истребителями в тренировочных полетах, при подготовке пилотов на тренировочных воздушных судах и подобные отсутствует необходимая статистика. Плотности распределения вероятностей (п.р.в.) подобных событиях только гипотетические, с неизвестными «хвостами», что совершенно исключает применение методов доверительных интервалов при традиционных подходах к оценке безопасности полетов в форме ВАБ [6].

**Ключевые слова:** системная безопасность, угроза, риски, шансы, точки риска и уязвимости, нечеткость, сценарное моделирование.

Главным теоретическим и методическим результатом статьи является решение проблемы «редких событий», по которым статистика отсутствует. ИКАО в 2010 году признало указанную проблему как важнейшую ввиду неопределенности информации из-за отсутствия достоверной статистики. Применяется современная трактовка «риска» как «меры опасности» при решении проблемы «редких событий» в классе нечетких подмножеств событий из сигмы алгебры – без методов теории вероятностных показателей событий. В ГА РФ концепция обеспечения безопасности полетов и разработки систем управления безопасностью (СУБ) построена на принципах и методологии исчисления уровня рисков в рамках положений классической теории надежности (ТН) и теории вероятностного анализа безопасности (ВАБ). В ВАБ принято положение, что «риск» – это «вероятность» возникновения негативного события.

Высокая надежность технических систем по вероятности не обозначает безопасности системы (не связана с безопасностью), т. к. в любой высоконадежной системе в скрытой форме заложен «остаточный риск» и существуют внешние поражающие факторы. Поэтому могут возникать события, хотя и очень редкие, но с очень большим ущербом, если не были предприняты меры проактивного управления возможными состояниями системы (по ИКАО, по NASA).

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо разработать альтернативную модель исчисления рисков возникновения редких негативных событий без применения концепции вероятностных показателей (ввиду неопределенности и нечеткости информации о свойствах критических по последствиям событий). Важным также является выявление некорректности применения показателя критичности состояний опасных систем в форме «среднего риска» для событий, происходящих с «вероятностью почти – ноль». Подобные задачи были рассмотрены ранее в [3–6], однако вопросы взвешивания «рисков и шансов» не получили достаточного освещения в научных публикациях в связи с разработкой стандартных СУБ и SMS (Система управления безопасностью полетов или Safety

Management System). СУБ (СУБП) – это множество взаимосвязанных и упорядоченных элементов или модулей (в минимальном составе по Annex-19), предназначенных для достижения цели управления по обеспечению необходимого уровня безопасности полетов в соответствии с принятым системным подходом.

*Пример 1.* Затопление г. Крымска (2012 г.). Катастрофа в виде затопления местности и жилых кварталов возникла (по СМИ) вследствие неожиданных «ливневых дождей» и математически трудно объяснима с позиции ТН, но совершенно очевидна при подходе по Fuzzy Sets. Причина аналогична случаю с «Боингом» [6].

*Пример 2.* Падение спутников типа «ФОБОС» – это события из класса редких, которые поддаются анализу на основе сценарного подхода и динамического моделирования по «принципу лунных экспериментов на Земле – до полетов», как было сделано в NASA [2].

### СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Новая схема решения задачи включает динамическое моделирование процессов смены дискретных состояний систем (ДМП), определяющих сценарии развития опасных ситуаций («сценарный подход» по терминологии В.В. Кульбы – ИПУ РАН – в «космической отрасли» [3]). При этом производится переход к исчислению рисков в проблеме «редких событий» на основе методов теории нечетких множеств с признанием нового определения риска как «количества опасности» (или «меры опасности» – по Г.Г. Малининецкому – ИПУ РАН [4]). Отвергается понятие того, что «риск есть вероятность события». Только при этом удастся оценивать значимость рисков в состояниях систем с вероятностью опасных событий «почти – ноль».

### ОБЪЕКТИВНЫЕ УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ «РЕДКИХ РИСКОВЫХ СОБЫТИЙ»

Принципиальное отличие математических объектов в системах обеспечения и управления безопасностью, как было указано выше, состоит в том, что изучаются события типа  $\bar{A}$  – обратные к событию  $A$ , как и в ТН, но только редкие и имеющие смысл «функционального отказа». Это означает, что при бинарном пространстве исходов изучаются события, дополнительные к  $A$ , т. е.

$$\bar{A} = 1 - A \text{ (в логическом смысле)}. \quad (1)$$

Можно полагать, что в технической системе с нормальными показателями качества, которые гарантируются с помощью методов теории надежности, изучаются случайные события типа «неотказ», т.е.  $\sim A$ . Качество подобных систем в ТН определяется по исходному событию  $A$  с потребительскими свойствами в виде показателя  $P_A$ , например, по «вероятности» события:

$$P_A = P\{A|\Sigma_0\}, \quad (2)$$

где  $P_A$  есть неслучайная (четкая) мера измеримости такого случайного события, имеющего неслучайную меру «количества случайности» в указанном выше соотношении (1). Физически и статистически  $P_A$  обозначает качество объектов  $A$  на некотором множестве  $\{A|\Sigma_0\}$  при условиях существования  $\Sigma_0$ . В высоконадежных системах эти показатели велики по значению и близки к единице:  $P_A \sim 1$ .

При этом показатель  $P_A$  – это вещественное неслучайное четкое число, которое может быть найдено очень точно и достоверно: априорно (аналитически – в идеальных или в прибли-

зительно идеальных условиях) или даже апостериорно, но при некоторых достоверных статистиках (из опытов).

Однако показатель «безопасности» в ТН оценивается в соответствующем «состоянии системы» по «уровню» серьезности *последствий*, но всегда *только на обратных*, дополнительных к  $A$ , событиях  $\bar{A}$  – типа «отказов». В ТН эти события несовместные и образуют генеральную совокупность в виде, например, бинарного пространства исходов  $\Omega$  при бинарном разбиении (1):

$$\Omega = A \cup \bar{A} \cup \emptyset \text{ (несовместные } A \text{ и } \bar{A}), \quad (3)$$

где  $\emptyset$  – элемент «пусто».

Таким образом, объекты, которые являются основой для оценивания некоторых свойств рассмотренных систем, могут быть и противоположными по признакам функциональности одной и той же системы. В ТН, как и в ВАБ, главная позиция состоит в том, что важнейшее состояние – признаки противоположного состояния – «безопасность» оценивается через «опасность». Для этого в ТН применяются дополнительные характеристики «последствий от некоторых отказов» в виде «критичности» этих отказов. Поэтому приходится вводить понятие отдельного «опасного»  $\bar{A} = \bar{A}_*$  или «рискового события»  $R$  такого, что это событие  $R \equiv \bar{A}_*$  влечет отрицательные последствия. Таким образом,  $\bar{A}_*$  – это не всегда тривиальный отказ  $\bar{A}$  со слабыми последствиями, но критический с символом (\*):

$$R \equiv \bar{A}_* = \bar{A}_*(\omega_{\xi_*} | H_R), \quad (4)$$

где  $H_R$  – обозначение цены (величины) негативного результата в форме некоторого ущерба,  $\omega_{\xi_*}$  – элементарное неопределенное событие с признаками случайности  $\xi$ , но с вероятностью «почти – ноль»;  $\bar{A}_*$  – класс событий. (В этом классе может быть введено и дополнительное событие  $B$  – шанс.).

Для каждого рискованного события может быть найдено альтернативное событие типа «удачи», на основе которого можно оценить «шансы выживания» за счет предупредительного управления состоянием авиационной системы.

### ОЦЕНКА ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ ПОНЯТИЯ «СРЕДНИЙ РИСК»

Недопустимо рассматривать, без оговорок области применения, понятие среднего риска для редких событий. В ТН признано, что критерием значимости (серьезности) риска при априорно известных вероятностях событий подобного рода является величина среднего риска  $\bar{R}(\bar{A}_*)$  [1–3, 6]. Эта величина определяется на подмножестве опасных (критических) событий из множества (3) типа

$$\bar{A}_* = \{ \bar{A}_{i_*} | H_{i_*}, i = 1, 2, \dots, m_* \},$$

которые дают на основе [5] аналог известной формулы А.Н. Махутова [1]:

$$\bar{R} \equiv \bar{R}_{\bar{A}_*} = H_* \cdot P_{\bar{A}_*} \approx \sum H_{i_*} \cdot P_{A^*i} \quad (5)$$

где  $\bar{A}_*$  – некоторый класс событий типа отказов; (\*) – знак критичности значения ущерба, например, в простейшем случае в виде  $H_*$  – совокупного ущерба,  $P_{\bar{A}_*}$  – вероятность

класса всех событий  $\bar{A}_*$  типа отказов из (4), (5), если все события в заданном классе несовместные.

Однако этот метод в общем случае не дает для сложных технических систем (СТС) корректных результатов. Приходится вводить иное, более общее, определение и формулу оценивания риска, пригодную и для «устойчивых статистик» и при отсутствии каких-либо сведений о значениях п.р.в., ф.р.в. в области «хвостов распределений». Следует отметить, что это обстоятельство детально проанализировано в [4], где указано, что при  $P_{A_*} \rightarrow 0$  оценивание среднего риска по (5) – это «абсурд» (В. Бенинг и др. Математические основы теории риска, 2011. С. 223, 227). Далее, можно также отметить, что идея «доверительных интервалов» [6] также не решает проблемы редких событий. Решение может быть найдено, например, на основе методов Fuzzy Sets [4], если отбросить понятие «случайности» по Гауссу («Гауссова модель») для редких событий и считать такие события неопределенными (хотя бы «нечеткими»).

На основе предлагаемого подхода в качестве примера [6] исследовались гипотетические причины катастрофы с ВС «Боинг 737» (Казань). Результаты проведенного анализа и опубликованных фактов по данной катастрофе, показали, что согласно новой теории рисков произошла «потеря функциональных свойств» по одной из непредвиденных в РЛЭ угроз, обусловленных проявлением отрицательного влияния «человеческого фактора».

Аварии и катастрофы возможны даже в высоконадежных системах. Задача в том, чтобы за счет целенаправленной деятельности и стандартных процедур снижать риск и уменьшать последствия для СТС от поражающих факторов с помощью алгоритма в СУБП.

Решение проблемы управления безопасностью полетов ВС заключается в разработке модели неопределенности возникновения редких событий типа «катастрофы» при отсутствии достоверной статистики об этих событиях, поскольку значения параметров отказов лежат в области «тяжелых хвостов» – за пределами интервалов  $[3\sigma - 6\sigma]$  высоконадежных СТС [1]. Математические ожидания и дисперсии значимых параметров, и функции распределения плотности вероятности параметров при нерасчетных условиях эксплуатации СТС – неизвестны.

**Математическая концепция риска по ИКАО.** Предложено создавать СУБП на основе формулировки риска по ИКАО *в форме* концепции:

### ***Risk Concept – "Likelihood & Severity of Harm",***

где предполагается применить (по ИКАО) некоторое сочетание из указанных элементов, но вид этого сочетания нигде не указан. Поэтому в ГА РФ, в частности, без оговорок, некорректно, применяется вычисление среднего риска в форме (5). Но для этого нет никаких оснований в ситуациях оценки воздействия угроз на системы при редких событиях, что было показано выше в (4), (5).

Данный вопрос рассматривался ранее авторами [1, 2] с общих позиций теории Гауссовых моделей неопределенности информации о «редких событиях». Здесь предлагается применение методов Fuzzy Sets. При этом в заданном универсальном множестве (3) объектов системы выделяются нечеткие подмножества элементов по признакам факторов, создающих угрозу безопасности с неопределенностью значений интегральных уровней рисков возникновения ущербов. Но существенное различие событий  $\bar{A}$  и  $R$  в том, что критические обратные события  $\bar{A}_*$ , включая  $R$  – «отказы», имеют ничтожную «почти – ноль» вероятность возникновения. Функционально эти события четкие, но вероятности обратных событий  $\sim 10^{-4} - 10^{-10}$  определены на «хвостах» значений соответствующих аргументов.

Предлагается принять, что физически риск (с уровнем  $\hat{R}$ ) – это опасность с нечеткой мерой  $\mu_1$  неопределенности (в частности случайности) возникновения рисковогоего события  $R$  из (2) с негативными (также нечеткими) последствиями в виде ущерба  $H_R$ . Поэтому формула оце-

нивания физической значимости рискового события (4) (по Куклеву Е.А.) [5, 6] имеет вид кортежа  $\tilde{R}$  с множеством элементов, характеризующих опасность с предполагаемым ущербом:

$$\tilde{R} = \langle \mu_1, H_R | \Sigma_0 \rangle, \quad (6)$$

где символы  $\langle \dots \rangle$  – кортеж;  $\Sigma_0$  – комплекс условий определения и испытаний системы в пространстве событий и принятая в СУБП модель опасности;  $\mu_1$  – мера (нечеткая или четкая) возможности (и неопределенности) появления события  $R$  из (2). Формулу (6) можно трактовать как математическую интерпретацию или запись концепции риска по ИКАО. С помощью универсальной формы (6) можно дать трактовку опасности (или безопасности) при нечетких мерах возможности возникновения рисковых событий типа (2), а также и при ВАБ. Появляются основания объяснить способы управления безопасностью полетов на множестве факторов угроз, определенных в классе Fuzzy Sets для ситуаций с редкими событиями.

### СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ FUZZY SETS

В инструментах по оценке безопасности систем на основе концепции ИКАО «по управлению рисками» и в задачах по оценке уровней безопасности систем с «редкими событиями» принято два методических подхода:

– процесс управления безопасностью составляют процедуры проактивного прогнозирования условий (угроз) возникновения в системах функциональных отказов, приводящих к катастрофе (или аварии);

– формирование возможных специальных управляющих воздействий на состояние системы с целью снижения рисков заранее – до момента времени, когда прогнозируемый функциональный отказ при каждой выявленной угрозе может произойти.

Принимается положение ИПУ РАН о том, что «риск» – мера опасности в форме «нечеткой» меры количества той опасности, которая появляется в любой момент времени  $\tau_1 \geq \tau_0$  после возникновения в момент времени  $\tau_0$  угрозы безопасности  $z(\varphi_i | \tau_0, R_i(\tau_1))$  по  $i$ -фактору опасности  $\varphi_i \in \Phi$ , где  $\Phi$  – некоторое множество источников опасности, порождающих конкретные виды угроз с факторами  $\varphi_i$ . При этом понятие риска становится показателем (предполагаемых или прогнозируемых) негативных последствий в СТС, которые могут возникнуть при заданной угрозе  $z(\varphi_i | R_i)$  вследствие опасного рискового события  $R_i(\tau_1 | \varphi_i(\tau_0))$ , которое было определено в общем виде в (4).

Большое число катастроф с известными причинами укладывается в методику прогнозирования условий их возникновения, например, на основе «уравнений катастрофы» – по ИКАО, по цепям Дж. Ризона, по дереву событий, составленных без применения вероятностных показателей, но на основе четкой логики анализа деревьев событий, определяемых на гиперкубе истинности [4] (по Рябинину И.А., по Фуджито И.М. [2] и по стандартам FMEA [2] и др.).

### КРИТЕРИИ ЗНАЧИМОСТИ (СЕРЬЕЗНОСТИ) РИСКА

При этом, в отличие от ВАБ, удастся связать воедино критичность сценариев событий, ведущих к катастрофе, и применить методы оценки состояний с помощью нечетких (лингвистических) переменных из сферы Fuzzy Sets в форме: (состояние опасное), (состояние безопасное), (риск велик), (риск мал), (шанс ничтожный или низкий) и т. д. и т. п. При этом может быть разработана структура системы обеспечения безопасности в виде некоторой SMS [3], с помощью которой решаются проблемы редких событий, возникающих с вероятностью «почти – ноль» [5].

В предлагаемой схеме решения задачи логически упорядочиваются наиболее важные показатели СТС и SMS следующего типа:

- точка уязвимости (место, где возникает угроза) и интервал уязвимости (нечеткие по Кульбе В.В.) [1, 3],
- точка риска, рисковое событие, благоприятное событие (шанс),
- точка бифуркации процесса [4], которая обозначает возникновение рискового (опасного) события  $R_i$  типа «катастрофы» (аварии) из [1, 5].

Точки уязвимости [3] понимаются как некоторые «болевы точки» СТС, где возможно возникновение угрозы. Так, удастся оценить риски возникновения негативных результатов в различных проектах. Например, в некоторых северных проектах В.В. Кульбы [3] точкой уязвимости является горловина Белого моря, которая в зимний сезон вследствие замерзания моря превращается в точку риска при морских перевозках. Это означает возникновение угрозы проекту в форме «потери функций горловины вследствие замерзания» в непредсказуемое время.

Новые определения «риска» и «шанса» в виде интегральных уровней значимости  $\hat{R}$  и  $\hat{B}$  критичности состояний с неопределенными событиями по (4), (5), даются в виде

$$\hat{R} = \hat{f}_R(\tilde{R}|\tilde{R}_*), \hat{B} = \hat{f}_B(\tilde{B}|\tilde{B}_*), \quad (7)$$

$$\tilde{R} = \langle \mu_1, H_R | \Sigma_{OR} \rangle, \tilde{B} = \langle \beta_1, V_B | \Sigma_{OB} \rangle, \quad (8)$$

где  $\tilde{R}, \tilde{B}$  – кортежи нечетких параметров рискового события  $R$  и соответственно события  $B$  – «выигрыша – шанса»;  $\Sigma_{OR}, \Sigma_{OB}$  – условия существования СТС как высоконадежной системы и модели «опасности» и «шансов»,  $\hat{(\dots)}$  – знак обозначает нечеткие интегральные показатели критичности системы в сравнении с приемлемыми уровнями риска  $\tilde{R}_*$  (или  $\hat{R}_*$ ) и шанса  $\tilde{B}_*$ . Нечеткость введена через термины: «риск мал, риск велик и значимый», ..., «шанс ничтожный», «шансы малые» ... и т. п.

## ВЫВОДЫ

Установлена схема решения проблемы оценки такого явления, как «возможность» возникновения случайных событий не с помощью вероятности, которую невозможно вычислить, а на другой основе (например, в проблеме редких событий) – Fuzzy Sets.

Риск-ориентированный подход к решению задач в теории операций позволяет отказаться от «гаданий» при определении вероятностей некоторых событий, которые все равно неизвестны. Поэтому в качестве рабочего метода может быть взят способ «взвешивания» рисков  $\hat{R}$  и шансов  $\hat{B}$  различных проектов при неопределенности информации в задачах назначения предпочтений вариантам решений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность полетов воздушных судов гражданской авиации с учетом рисков возникновения негативных событий / М.Ю. Смуров, Е.А. Куклев, В.Г. Евдокимов, Г.Н. Гипич // Транспорт Российской Федерации. № 1 (38). 2012. С. 54–58.
2. Риски и безопасность авиационных систем: монография / Г.Н. Гипич, В.Г. Евдокимов, Е.А. Куклев, В.С. Шапкин. М.: ИНСОФТ, 2013. 178 с.
3. Шульц В.Л. и др. Структурно-динамический подход к сценарному анализу процессов информационного противоборства в Арктике / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Конференция по УБП СТС, июль 2014.

4. **Малинецкий Г.Г. и др.** Управление риском. Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. М.: Наука, 2000. 431 с.

5. **Куклев Е.А.** Оценивание рисков катастроф в высоконадежных системах // Тр. 13-й междунациональной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». ИПУ РАН. М., 2005. С. 55.

6. **Куклев Е.А., Михальчевский Ю.Ю., Смуров М.Ю.** Динамическое моделирование сценариев возникновения рисков событий при полетах ВС в режиме «Ухода на второй круг» // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 2.

## FLIGHT SAFETY CONTROL OF THE BASIS OF UNCERTAIN RISK EVALUATION WITH NON-ROUTINE FLIGHT CONDITIONS INVOLVED

**Kuklev E.A.**

The article deals with methods of forecasting the level of aviation safety operation of aircraft systems on the basis of methods of evaluation the risks of negative situations as a consequence of a functional loss of initial properties of the system with critical violations of standard modes of the aircraft. Mathematical Models of Risks as a Danger Measure of Discrete Random Events in Aviation Systems are presented. Technological Schemes and Structure of Risk Control Procedures without the Probability are illustrated as Methods of Risk Management System in Civil Aviation. The assessment of the level of safety and quality and management of aircraft, made not only from the standpoint of reliability (quality and consumer properties), but also from the position of ICAO on the basis of a risk-based approach. According to ICAO, the security assessment is performed by comparing the calculated risk with an acceptable level. The approach justifies the use of qualitative evaluation techniques safety in the forms of proactive forecasted and predictive risk management adverse impacts to aviation operations of various kinds, including the space sector and nuclear energy. However, for the events such as accidents and disasters, accidents with the aircraft, fighters in a training flight, during the preparation of the pilots on the training aircraft, etc. there is no required statistics. Density of probability distribution (p. d. f.) of these events are only hypothetical, unknown with "hard tails" that completely eliminates the application of methods of confidence intervals in the traditional approaches to the assessment of safety in the form of the probability analysis.

**Key words:** system safety, danger, risks, chance, risk and vulnerability point, scenario modelling.

### REFERENCES

1. **Smurov M.J., Kuklev E.A., Evdokimov V.G., Gipich G.N.** Safety of flights of aircrafts of civil aviation, taking into account risk of occurrence of negative events. Transport Of The Russian Federation. No. 1 (38). 2012. Pp. 54–58. [In Russian].

2. **Gipich G.N., Evdokimov V.G., Kuklev E.A., Shapkin V.S.** Risks and safety of aviation systems. Monograph. Moscow, 2013. [In Russian].

3. **Shultz V.L., Kulba V.V., Chernov I.V., Shelkov A.B.** Structural-dynamic approach to scenario analysis of the processes of information confrontation in the Arctic with problems control. V.A. Trapeznikov Academy of Sciences. Conference on UBP STS, July 2014. [In Russian].

4. **Malinetskii G.G., Kulba V.V., Kosjachenko S.A., Shnirman M.G.** Risk Management. Risk. Sustainable development. Synergetics. Moscow, Nauka, 2000, 431 p. [In Russian].

5. **Kuklev E.A.** Assessment of risks of catastrophes in highly reliable systems. Publications of 13-th int. Conference. "Problems of safety management of complex systems". IPU RAN. Moscow, 2005. P. 55. [In Russian].

6. **Kuklev E.A., Michalczewski Yu.Yu., Smurov M.Y.** Dynamic simulation of scenarios of occurrence of risk events during the flight mode "go-around". The MSTUCA Scientific Bulletin. Moscow, 2014, Issue 2. [In Russian].

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Куклев Евгений Алексеевич**, заведующий кафедрой механики, директор Центра экспертизы СПб ГУГА, д.т.н. профессор, электронный адрес: ekuklev@mail.ru.