

Литература:

1. *Atkin R.H.* Combinatorial Connectivities in Social Systems. An Application of Simplicial Complex Structures to the Study of Large Organisations. – Birkhäuser Basel, 1977. – 245 p.

2. *Atkin R.H., Casti J.* Polyhedral Dynamics and the Geometry of Systems. RR-77-International Institute for Applied Systems Analysis. – Laxenburg, Austria. – March, 1977. – 36 p. – URL: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/709/1/RR-77-006.pdf> (дата обращения 10.10.2023).

3. *Касту Дж.* Большие системы: связность, сложность и катастрофы. – М.: Мир, 1982. – 216 с.

4. *Горелова Г.В., Захарова Е.Н., Радченко С.А.* Исследование слабоструктурированных проблем социально-экономических систем: когнитивный подход. – Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 2006. – 332 с.

5. *Galina V. Gorelova.* Cognitive Modeling of Complex Systems: State and Prospects / In: Vasiliev Y.S., Pankratova N.D., Volkova V.N., Shipunova O.D., Lyabakh N.N. (eds) System Analysis in Engineering and Control. SAEC 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. – Volume 442. – Springer Nature Switzerland AG, 2022. – P. 212-224.

6. *Firsova A., Gorelova G., Makarova E.L., Makarova E.A., Chernyshova G.* Simulation Cognitive Modeling Approach to the Regional Sustainable Complex System Development for Improving Quality of Life // *Mathematics*. – 2023. – Volume 11. Issue 20. – 4369. – DOI: 10.3390/math11204369.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018661506. Программа для когнитивного моделирования и анализа социально-экономических систем регионального уровня. Авторы: Горелова Г.В., Калиниченко А.И., Кузьминов А.Н. – 07.09.2018.

---

DOI: 10.25728/iccss.2023.19.92.007

Куклев Е.А.

**Модель «Спящей катастрофы Ризона» в качестве элемента СУБП в гражданской авиации**

**Аннотация:** Предлагаются принципы и способ и построения системы управления безопасностью полетов

воздушных судов (ВС) на основе концепции Fuzzy Sets ввиду нечеткости (неистинности) состояний элементов исследуемых систем в ситуациях с редкими событиями, возникающих с вероятностью «почти – ноль». Смена дискретных состояний авиационной системы моделируется с помощью языка знаковых орграфов.

**Ключевые слова:** риск, рисковое событие, минимальное сечение отказов, угроза безопасности, «уравнение катастрофы»

### **Введение**

Рассматриваются вопросы оценивания уровней безопасности различных систем при известных угрозах безопасности, которые уже обнаружены или могут быть объявлены, при заданных ситуациях эксплуатации систем. Для обеспечения приемлемого уровня безопасности необходимо создавать такое управление состояниями системы, при котором предлагается оценивать меру некоторого показателя с названием «риск» на основе методов вероятностного анализа безопасности (ВАБ) понятие риска дается в виде [1]: «Риск – это вероятность возникновения некоторого опасного события  $R$  с негативным результатом или ущербом» в критической ситуации.

На основе действующих стандартов и положений [1], принятых в ВАБ, критической ситуацией считается «полный функциональный отказ [1, 2] системы» типа  $A_0 \rightarrow \bar{A}_{0*}$ , где  $A_0$  – событие существования «функциональности»,  $\bar{A}_{0*}$  – отказ системы в критическом состоянии со знаком (\*). Но в высоконадежных (отказоустойчивых) системах события подобного типа  $R$  очень редкие и возникают с вероятностью «почти – ноль» [2, 3].

В работах [3, 4] четко указано, что «при вероятности  $P_*(R) = 0$  – ущерба не возникает», т.е. риск – нулевой и система – «безопасная».

Однако в реальных условиях область существования подобных событий находится в пределах определения границ «тяжелых хвостов» функций распределения плотностей вероятности (ф.р.п.в.) [3], где численные значения вероятностей очень малые («неистинные») и не могут быть заданы четко. Такую величину как

«средний риск (по ущербу)» невозможно определить. Следовательно, аппарат ВАБ непригоден для поиска уровней безопасности систем и должен быть полностью заменен.

Необходимо ввести новое определение «риска» и рискового события (1) на основе нечеткого события «возможности» с нечеткой шкалой значимости (важности, опасности) с помощью «лингвистических» переменных – по Fuzzy Sets [3, 4] и в методе РОП [5]: РОП – риск-ориентированный подход – по ИКАО, НАСА [2, 5]. Предлагается использовать идею Дж. Ризона [2] из РОП в следующем виде:

«Катастрофа заложена в системе и только ждет  
своего проявления» (\*)

Здесь для общности введено новое название этой формулы в виде «Спящая катастрофа Ризона», чтобы избежать широко известных графических изображений типа «Сырная диаграмма» [5], не имеющих никаких «аналитических описаний».

Предлагается применить риск-ориентированный подход (РОП) НАСА/ИКАО [2, 5], позволяющий исследовать конфликтные ситуации с учетом неопределенности (неистинности) информации о редких событиях в высоконадежных системах [6]. Новым элементом в РОП является математический объект в виде нового показателя [2, 5] – «интегрального риска»  $\hat{R}$  (с крышкой: «^»- по [2]), который задает уровень опасности на основе превентивного (проактивного) прогноза и анализа функциональных свойств системы, заданных некоторым комплексом исходных свойств системы с символом  $\Sigma_0$  [7].

### **1. Постановка задачи определения уровней безопасности полетов ВС на основе концепции Fuzzy Sets при РОП**

На основе [1] принимается, что безопасностью можно управлять. Критической ситуацией считается «полный функциональный отказ системы» типа  $A_0 \rightarrow \bar{A}_{0*}$ . Кодом критичности является «минимальное сечение отказов», вполне определяющее состояние  $\bar{A}_{0*}$  по параметрам элементов в цепи  $L_*$  с учетом их состояний. Вводится некоторая логическая композиция

типа «конъюнкции», дающей трактовку опасного (рискового) события  $R$  для каждого фактора  $z_i$  угроз из множества угроз  $Z_R$ :

$$\vec{R} = R(L_R | Z_R) \Rightarrow H_R, \quad R_* \in \bar{A}_{0*}, \quad R_* \in \bar{A}_{0*}, \quad z_i \in Z_R, \quad (1)$$

где знак ( $\Rightarrow$ ) порождает (следствие в виде  $H_R$  - «вреда»).

Необходимо найти новую оценку риска в виде величины  $\hat{R}$  – по [2, 5] возникновения последствий вследствие события типа (1).

Рассматриваются позиции очень редких событий в ситуациях высоконадежных (отказоустойчивых) систем с вероятностями  $P_*(R|\Sigma_0)$  – «почти – ноль» в виде:

$$P_*(R|\Sigma_0) \rightarrow "0", \quad \Sigma_0 = \{e_j \in E; z_i \in Z_R; G = (Q,)\} \quad (2)$$

где для  $P_*$  должно быть задано по [1] значение вероятности возникновения события (1) из некоторого четкого вероятностного пространства из ВАБ.

При этом:  $G$ -граф,  $Q$ -множество дискретных состояний системы,  $B$  - отображение « $Q$  в  $Q$ », т.е.  $G = (Q, BQ)$  – по [1].

В фундаментальной работе [3] у Малинецкого Г.Г и Кульбы В.В. четко указано, что «при вероятности  $P_*(R) = 0$  ущерб не возникает», риск – нулевой, т.е. численные значения вероятностей очень малые («неистинные») и не могут быть заданы четко.

Таким образом, публикация в 2-х фундаментальных работах [3, 4] образует базу из 2-х взаимосвязанных модулей, обеспечивающих достижение нового синергетического эффекта в целом («Emergency») с использованием соответствующего 3-его элемента – сигнальной системы в виде СУБП – в виде модели «Спящей катастрофы Ризона» с использованием свойств функциональности системы с символом  $\Sigma_0$ .

## 2. Схема определения облика прогнозируемой «Спящей катастрофы Ризона» на основе аксиоматики рисков – по Fuzzy Sets (решение задачи)

2.1. *Общие определения.* Принимается следующая гипотеза «о нечеткой измеримости неопределенности 3-го типа»: «Риск  $\hat{R}$  – нечеткое количество опасности», обусловленное системными факторами недостатков реальных технических конструкций даже при их высокой надежности. Принимается, что невозможно управлять «вероятностью», значение которой мало и которая находится для события типа катастрофы в диапазоне значений аргумента ф.п.р.в. – от  $3\sigma$  до  $6\sigma$  – на «тяжелых хвостах распределений» [3], для которых не найдено никаких достоверных описаний [3, 5]. Необходимо проактивно (по прогнозу) обеспечить условия (3):

$$\hat{R} : \{ \hat{R} < \hat{R}_*, \dots, \hat{H}_R < \hat{H}_{R^*} \}, \quad (3)$$

«Безопасность – это состояние, при котором нечеткий уровень «риска» нанесения вреда или приемлемого ущерба  $\hat{H}_R$  не превышает заданного уровня (приемлемого риска)»  $\hat{R} < \hat{R}_*$ , т.е. ущерб  $\hat{H}_R$  должен быть «в норме»:  $\hat{H}_R < \hat{H}_{R^*}$ . Приемлемый ущерб  $\hat{H}_{R^*}$  определяется заранее на основе алгоритмов СУБП при некоторой нечеткой мере.

Облик «спящей катастрофы Ризона» определяется с применением 3-х базовых моделей, указанных выше, которые принимают следующие названия (по традициям АСК «Келдыш» [3]).

Цифровой двойник функциональности (ЦДФ-1) – по аналогии с ЦДФ-1 для жидкостных ракетных двигателей, но здесь для авиационных систем любой сложности на основе классификатора рисков [3];

Цифровой двойник функциональности (ЦДФ-2) – структурно – графовая система логических связей дискретных состояний в сложных системах [4];

ЦДФ-3 – комбинаторный двойник системы, содержащий множество цепей дискретных состояний системы с оценкой критичности найденных состояний по прогнозируемым ущербам, что необходимо для определения «уравнения катастрофы» на основе множества выделенных нечетких компактов с их нечеткими дополнениями [7].

2.2. Структура рискового события  $R$  и меры риска  $\hat{R}$  при новой трактовке по РОП» в нечеткой алгебре СУБП – (по НАСА/ИКАО). Новое понятие рискового события  $R$  в счетных множествах элементов (без вероятностных свойств для редких событий) при вероятностях событий «почти – ноль» естественно выводится и всегда описывается достоверно (истинно) – через функции реальных элементов системы, например, в форме цепочки отказов элементов при функциональных отказах. Математически событие  $R$  – это класс событий (на сигме – алгебре –  $F$  из  $Vp$  [6]), составленный из элементарных событий  $\omega \in \Omega$  «омега» для каждой из цепей событий в форме сценария  $L_R$ , вытекающего из (8) и дающего в целом событие  $R$  – сценарий по (4) с мерой  $\mu$  последствий в виде ущерба  $H_R$  :

$$R = R(\gamma|Z_R, \mu, H_R, \Sigma_0) \sim L_R \sim R, \quad (4)$$

где для общности моделей (ТН и ТСБ) введен параметр ( $\gamma$ ) неопределенности любого вида, которая выбирается с учетом контекста задачи. Вводится нечеткое множество  $\tilde{R}$  – модель или «образ опасности» в виде кортежа, где некоторые атрибуты – нечеткие:

$$\tilde{R} = \langle Z_R, \mu, H_R | \Sigma_0 \rangle, \quad (5)$$

2.3. Структура цепи событий в «Уравнении катастрофы». Уравнение катастрофы формально конструируется по методу «минимального сечения отказов» в виде конъюнкций факторов опасности отказов (или только логических признаков этих факторов) путем использования «Образа» опасности»  $\tilde{R}$  как модели

опасности. Из операции «импликации нечетких отношений» вытекает формула конъюнкции «для опасного сечения отказов»:

$$U_R = (\varphi_0 \wedge \varphi_1 \wedge \varphi_2 \wedge \dots \wedge \varphi_k) = 1, \quad (6)$$

$$R \rightarrow L_R \Rightarrow U_R = (\varphi_0 \wedge \varphi_1 \wedge \varphi_2 \wedge \dots \wedge \varphi_k) = 1 \quad (7)$$

Значение  $U_R = 1$  обозначает, что «катастрофа» возможна для уровней рисков – по шкале NASA или по таблицам (а) или (б) из [2, 5] (по АСУР [7] из «7- СЕВЕН»: «очень редко», «иногда», «редко», «нечасто», «часто».

Некоторые решения по этой проблеме следующие:

–  $V_p$  – вероятностное пространство Колмогорова А.Н. – четкое: но отвергается и осуществляется переход [6] к нечеткой алгебре AL для  $\hat{R}$ . Из  $V_p$  берется только сигма – алгебра  $F$  – четкий атрибут, определяющий физическую инфраструктуру системы обеспечения надежности в силу гипотез (по ТН) о независимости набора функциональных элементов исходной системы  $\Sigma_0$ . «Уравнение катастрофы» типа (5) отражает структуру сценария или «пути к катастрофе» (в заданном смысле) как результат логической операции «импликации» в нечеткой алгебре – в концепции Fuzzy Sets. Физические (истинные причины) или инициирующие факторы опасности заложены «Четко» в «носителе» базового множества, т.е. в «Универсуме». Эта информация задает функциональные свойства системы и может считаться «истинной» и достоверной – «первично».

*2.4. Общая схема создания SMS на основе концепции НАСА («Спящая катастрофа»)*

Схема следующая:

- «искать условия возникновения «спящих аварий и катастроф», которые встроены в систему и только ждут своего проявления («путем прогнозирования») на основе (\*);
- найти (построить) «Уравнение катастрофы»;
- произвести на основе «Уравнения катастрофы» корректирующие процедуры – «Смягчения» – прогнозируемых рисков в опасных ситуациях (сконструировать альтернативные

сценарии развития событий в найденных цепочках событий, приводящих к «катастрофам»);

- определение «гиперкуба истинности» функциональных состояний систем, меняющихся под влиянием факторов опасности (или факторов риска), порождаемых известными угрозами;

- определение кодов катастроф, оценка ущербов, составление таблиц (матриц) ущербов, потерь, вреда и др. последствий от факторов угроз.

Пример простейшей модели «Спящей катастрофы Ризона» в виде «Таблицы истинности T1» (таблица 1). Используются все три двойника систем: ЦДФ-1, ЦДФ-2, ЦДФ-3 [3, 4, 6].

Сценарий с указанным кодом катастрофического состояния вытекает из «орг-графов» [4].

Таблица 1 – Таблица истинности T1 (для 3-х мерного куба истинности)

$x_1$	$x_2$	$x_3$	Коды
0	0	0	$d_1$
1	0	0	$d_2$
0	1	0	$d_3$
0	0	1	$d_4$
1	1	0	$d_5$
0	1	1	$(d_6^*)$
1	0	1	$d_7$
1	1	1	$d_8$

Проверка «достоверности» (истинности) «Уравнения катастрофы» типа (4). Физические (истинные причины) или инициирующие [1] факторы опасности заложены «четко» в «носителе» базового множества, т.е. в «Универсуме». Эта информация задает функциональные свойства системы и может считаться «истинной» и достоверной – «первично».

2.5. «Смягчение» («Mitigation») значимости рисков с применением «Уравнения катастрофы»

Управляющее решение по НАСА [3, 1, 9] – это изменение состояния системы (не факторов). Принимается гипотеза «о

нечеткой измеримости неопределенности 3-го типа»: «Риск  $\hat{R}$  – нечеткое количество опасности», обусловленное системными факторами недостатков реальных технических конструкций даже при их высокой надежности – без оценки вероятностей, только на основании расчета потенциального ущерба, например, на основе условий гибели системы в ситуациях с конкретными сценариями катастроф.

Сценарии событий, «ведущих к катастрофе», составляются и исправляются поэтапно.

### **Заключение**

Установлено, что риск – ориентированный подход (РОП), рекомендованный ИКАО для применения в Гражданской авиации России, достаточно адекватно позволяет прогнозировать возможные критические последствия для воздушных судов от воздействия факторов угроз безопасности без обширной статистики происшествий.

Создано полноценное «импортозамещение» методов корректного проектирования в ГА РФ важной технологии по созданию безопасных систем типа СУБП с применением таблиц и рекомендаций на основе РОП в виде программ MEL(MMEL): «Minimal Equipment List» (по опыту «Боингов» и «Аэрбасов»). Эти программы до сих пор тщательно охраняются разработчиками зарубежных ВС (Центры «Тулуза» и «Боинг»).

### **Литература:**

1. *Аронов И.З., Александровская Г.Г. и др.* Безопасность и надежность технических систем. – М.: Логос, 2008. – 286 с.

2. Aviation Security Global Risk Context Statement. – ICAO. Montreal, 2016. – URL: <https://www.icao.int/WACAF/AFI-Safety-Week/Documents/Security%20Symposium/Risk%20Content%20Statement%20June%202016.pdf> (дата обращения 1.10.2023).

3. *Малинецкий Г.Г., Кульба В.В., Косяченко С.А., Шнирман М.Г. и др.* Управление риском. Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. – М.: Наука, 2000. – 431 с.

4. *Шульц В.Л., Кульба В.В., Шелков А.Б., Чернов И.В.* Сценарный анализ в управлении геополитическим информационным противоборством. – М.: ИПУ РАН, 2015. – 562 с.

5. Руководство по управлению безопасностью полетов (документ 9859). 4-е изд. Международная организация гражданской авиации (ИКАО), 2018.

6. *Куклев Е.А.* Риск-ориентированный подход к управлению безопасностью сложных систем на основе нечеткой логики анализа критичности эксплуатационных ситуаций / Сборник трудов «XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019)». – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 2575-2580.

7. *Орловский С.А.* Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981. – 206 с.

---

DOI: 10.25728/iccss.2023.47.53.008

**Севастьянов М.О., Климаков В.С., Старков Р.В., Изергин Н.Д., Мещеряков Р.В.**

### **Формирование требований по полигонно-тренировочной базе специального назначения**

**Аннотация:** В работе предлагается подход по формированию требований к полигонам, на которых осуществляется подготовка специалистов с использованием оборудования, включающего современные робототехнические средства.

**Ключевые слова:** полигон, требование, тренировка, специальное назначение, безопасность

Проведение тренировочных мероприятий требует внимательного отношения к силам и средствам как размещения, так и обеспечения взаимосвязей всего комплекса действий. Очевидно, что указанная задача относится к направлению сложных систем и требует согласованного системного подхода по анализу и выработке решений для формирования требуемых навыков и отработки различных сценариев применения специальных средств.

В настоящее время специалисты по операциям составляют типовые сценарии поведения при распределении сил (как людей, так и оборудования, и технических средств). Вместе с тем сложность поведенческих сценариев не всегда может быть представлена в виде последовательного выполнения простых