

УДК 629.7.017.1

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ В ПОСЛЕГАРАНТИЙНЫЙ ПЕРИОД

© 2012 В.А. Москаев

Военный авиационный инженерный университет, г. Воронеж

Поступила в редакцию 05.10.2012

В статье описывается методика оценки безопасности эксплуатации авиационной техники в послегарантийный период, основанная на нечёткой когнитивной модели, фрактальной гипотезе и соотношении для времен циклов при ранговом фрактальном распределении. Данная методика позволяет по результатам мониторинга системы эксплуатации и экспертным данным определять с оцениваемой уверенностью уровень безопасности и допустимый срок службы авиационной техники после истечения гарантийного срока.

Ключевые слова: безопасность, авиационная техника, нечеткая когнитивная модель, фрактальная гипотеза, время цикла.

Как следует из документов ИКАО и из Воздушного кодекса РФ, для обеспечения безопасности полетов необходима эффективная работа системы обеспечения безопасной эксплуатации воздушных судов. В настоящее время, отечественная система контроля за обеспечением безопасной эксплуатации воздушных судов основана на поэтапном установлении (продлении) ресурса и срока службы авиационной техники (АТ) [1-3].

Одной из проблем организации эксплуатации авиационной техники (АТ) является определение предельных сроков эксплуатации АТ. Её решение связано с оценкой уровня безопасности эксплуатации АТ, находящегося за пределами гарантии.

Решение рассматриваемой проблемы должно основываться на оценке фактического технического состояния АТ с прогнозом его динамики в процессе эксплуатации с учётом безопасности, оценке остаточного ресурса и в случае необходимости его коррекции.

В случае эксплуатации АТ в послегарантийный период, когда увеличены интенсивности отказов, повышены вероятности возникновения непредвиденных аномалий, её безопасность естественно зависит от длительности эксплуатации (времени жизни). Действительно, после истечения гарантийных сроков безопасность эксплуатации обусловлена дополнительными рисками, связанными с понижением надёжности. Для эффективной эксплуатации АТ следует изучать эти риски и корректировать допустимое время эксплуатации.

Острота и важность проблемы обеспечения безопасности эксплуатации АТ в послегарантий-

ный период заключается в том, что она на научном уровне на сегодняшний день недостаточно разработана, а на инженерном уровне решается во многом интуитивно. При этом практически отсутствует научно-методический аппарат нормирования требований к безопасной эксплуатации АТ, её анализа, а также обоснования методов обеспечения её требуемого уровня.

В настоящее время, учёт объективной ретроспективной зависимости остаточного ресурса от условий эксплуатации АТ затруднён в связи с отсутствием методического аппарата преобразования его результатов как в достоверный уровень безопасности эксплуатации в послегарантийный период, так и в оценку длительности неизменности такого уровня.

Это приводит к уменьшению полноты безопасности. Полнота (целостность) безопасности (Safety integrity - термин IEC 61508) понимается как вероятность того, что система безопасности удовлетворительно выполняет требуемые функции безопасности по всем predetermined условиям в течение установленного интервала времени.

Задача обеспечения безопасности послегарантийной эксплуатации АТ в послегарантийный период на сегодняшний день стоит очень остро. Как правило, её решение на научном уровне сводится к использованию существующих вероятностных и возможностных методов [4-7], но получаемые при этом модели недостаточно полны, а исходные данные не всегда представительны. Данное обстоятельство свидетельствует об актуальности разработки методики прогнозирования, оценивания и задания требований к количественным показателям безопасности, с учетом различных условий эксплуатации АТ, которая обеспечит возможность конст-

Москаев Вячеслав Александрович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры авиационных двигателей. E-mail: moskaev82@mail.ru

руктивной оценки уровня безопасности эксплуатации АТ в послегарантийный период при слабо формализуемой исходной информации.

Для достижения цели в работе использован новый подход к изучению безопасности эксплуатации АТ, который заключается в обоснованном применении фрактальной гипотезы и теории нечеткой логики.

Благодаря их синтезу разработана нечеткая когнитивная модель оценки уровня безопасности эксплуатации АТ в послегарантийный период на основе применения алгоритмов нечеткой логики типа Мамдани [9] и менее объемных блоков процедурных правил нечеткого вывода.

Использование данного алгоритма обеспечивает терпимость результата к неточностям и неопределенностям исходных данных вероятностных и возможностных методов и позволяет увеличить чувствительность получаемого уровня безопасности за счет обоснованного изменения формы функции принадлежности входных опасных факторов.

Фрактальная гипотеза позволила расширить спектр изучаемых входных опасных факторов модели с помощью определения функциональной связи их числа с числом наиболее значимых факторов, достаточных для идентификации ситуации в период эксплуатации АТ после истечения гарантийных сроков. Необходимо отметить, что благодаря перечисленным достоинствам модель может применяться в процессе как испытаний так и инженерных расчетах при прогнозировании уровня безопасности эксплуатации АТ для различных трудно формализуемых опасных фак-

торов на входе модели.

Ниже приведены результаты компьютерного моделирования на основе исходных данных, полученных в результате опыта эксплуатации авиационной техники и экспертного опроса ряда ведущих специалистов в области эксплуатации ЛА. Когнитивная fuzzy-модель (функциональный граф) разработана в известном пакете fuzzy-tech. Модель развивает предварительно построенную когнитивную карту (знаковый граф), используя алгоритм нечеткой логики типа Мамдани из fuzzy-tech.

Когнитивная карта представлена в виде трёх интегральных блоков со своим базовыми факторами:

Блок NTechS “безопасность техногенных воздействий” со следующими базовыми факторами: a1 – динамика тепловых и ударных воздействий; a2 – динамика (значимость) коррозионных воздействий; a3 – неисправности коммутационной аппаратуры.

Блок Incor “Безопасность в связи с неисправностями и доработками” со следующими базовыми факторами: v1 - качество доработок предприятиями изготовителями; v2 - темп ремонтных работ; v3- интенсивность неисправностей.

Блок SysS “Системная безопасность” со следующими базовыми факторами: c1 - обеспеченность финансовыми средствами; c2 - степень продления гарантийных сроков и системная долговечность; c3- квалификация персонала.

Когнитивная fuzzy-модель (функциональный граф) представляет трёхуровневый комплекс fuzzy-моделей (рис.1). Первый уровень – блоки

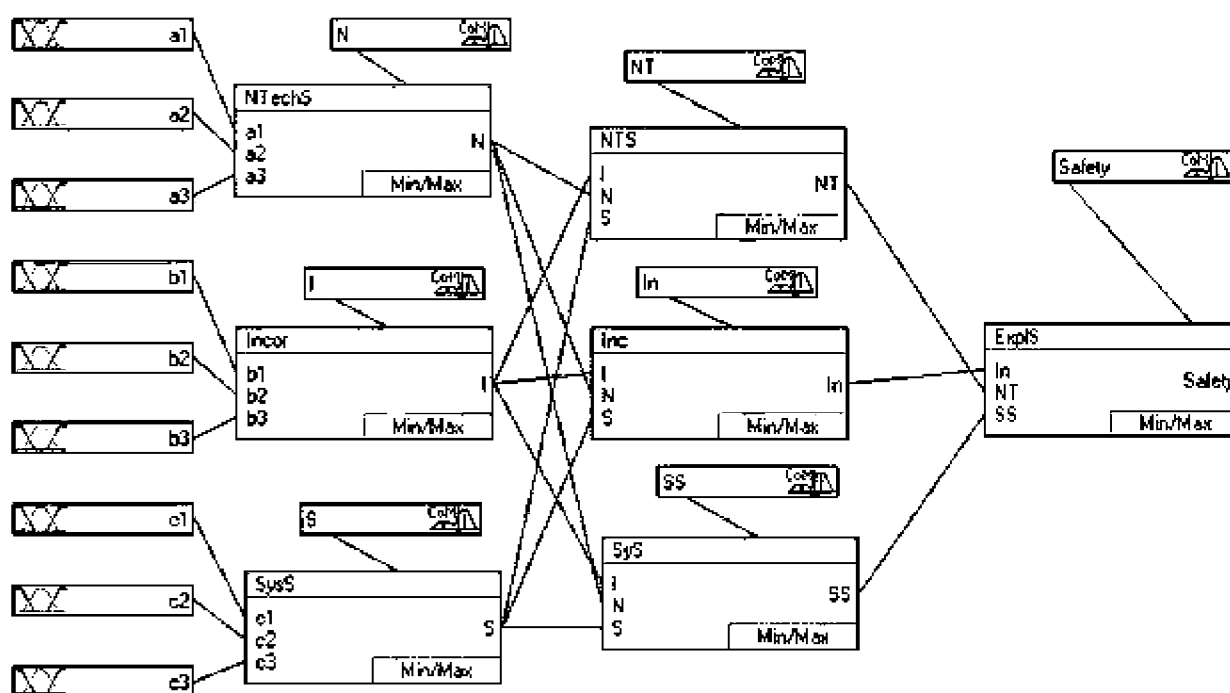


Рис. 1. Схема когнитивной fuzzy-модель

правил NTechS, Incog и SysS с базовыми факторами (входами). Девять входов – лингвистические переменные описаны соответствующими терм-множествами по три трапециидальных функции принадлежности каждое. Второй уровень; здесь три блока правил NTS, Inc, SyS и три выхода (NT,In, SS); характеризует влияние взаимовлияние базовых факторов блоков А,В,С. Третий уровень – выход модели (Safety); здесь один блок правил ExprS и один выход Safety описан термножеством с четырьмя функциями принадлежности трапециидального типа (достаточная, предкризисная, кризисная, критическая).

Результаты построенных графиков (рис. 2 - 4) области уровня безопасности в пространстве

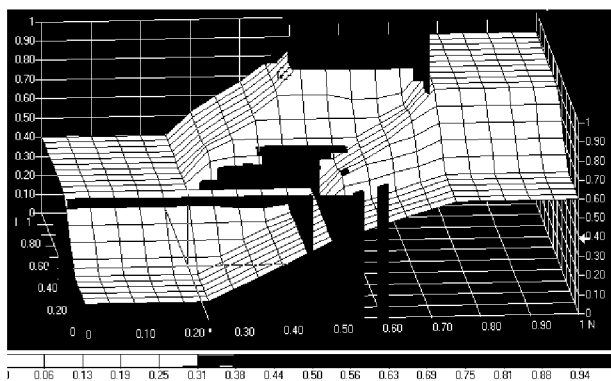


Рис. 2. Зависимость безопасности эксплуатации от I и N

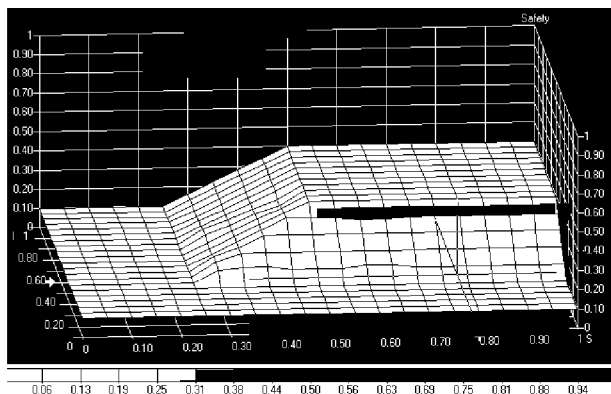


Рис. 3. Зависимость безопасности эксплуатации от I и S

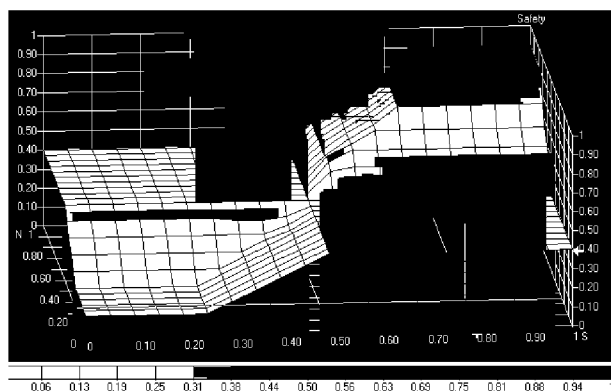


Рис. 4. Зависимость безопасности эксплуатации от N и S

базовых факторов, подтверждают адекватность созданной когнитивной fuzzy-модели и дают основание сделать вывод о применимости результатов теоретических исследований для оценки безопасности эксплуатации АТ в послегарантийный период.

При рассмотрении аспектов безопасности в работе [10] было принято положение, что абсолютной безопасности не существует - после принятия защитных мер некоторый остаточный риск всегда остается. Риск R_s рассматривается как вероятный ущерб, т.е.

$$R_s = FN, \quad (1)$$

где F – частота появления опасности, N – размер ущерба. Требуемый уровень безопасности непосредственно связан с приемлемым уровнем риска. Связь частоты F и размера ущерба N носит фрактальный характер, т.е.

$$F = AN^{-d}, \quad (2)$$

где d – фрактальная размерность, A – наименьший возможный ущерб.

Подставляя выражение (2) в (1), получено выражение для риска безопасности:

$$R_s = AN^{-d}N = A/N^{(d-1)}, \quad (3)$$

Нормативные значения и соответствующий лингвистический словарь для экспертов при построении когнитивной модели безопасности эксплуатации АТ имеет вид, представленный в табл. 1.

С помощью разработанной нечеткой когнитивной модели и использования полученного лингвистического словаря для экспертов проведена экспертная оценка уровня безопасности эксплуатации группы ЛА и полноты безопасности. К проведению оценок были привлечены пять экспертов, исполняющих обязанности на различных инженерных должностях в авиационной промышленности. Оценка данных, представленных экспертами о входных факторах когнитивной fuzzy-модели представлены ниже.

a_1 =малый (0,25), a_2 = средняя (0,6),
 a_3 =средний(0,6);
 b_1 =высокий (0,75), b_2 = средний(0,6),
 b_3 =высокая(0,75);
 c_1 = низкая (0,25), c_2 = средняя (0,6),
 c_3 = высокая (0,75).

Была проведена оценка согласованности оценок экспертов. Использовалось известное в статистике и теории экспертных оценок выражение для коэффициента конкордации Кендалла:

$$q = \frac{12S}{k^2(n^3 - n)}, \quad (4)$$

$$S = \sum \left(\sum r_{kj} - \frac{k(n+1)}{2} \right)^2,$$

где k – число экспертов, n – число входных па-

Таблица 1. Нормативные значения

Уровень безопасности	Интегральный уровень безопасности (LIS)	Риск	F	Треугольное число
Низкий, малый	1,2	Недопустимый (чрезмерный)	$10^{-4} \dots 10^{-5}$	(0.25;0,2)
средний	3	приемлемый	$4 \cdot 10^{-6} \dots 7 \cdot 10^{-6}$	(0.6;0,2)
высокий	4	пренебрежимый	$10^{-6} \dots 10^{-7}$	(0.75;0.25)

раметров, r_{kj} – сумма оценок входного параметра всеми экспертами.

Расчёт проводился в пакете Statistica, где использовался модуль “Непараметрическая статистика и распределения” и опция “Anova Фридмана и конкордация Кендалла”.

Коэффициент конкордации пяти экспертов оказался равным 0,85 при уровне значимости (p -уровне) 0,03, что даёт основание сделать вывод о достаточной согласованности мнений экспертов о величинах входов когнитивной модели (a, b, c).

Уровень безопасности эксплуатации группы ЛА получен низкий Safety=0.35, риск недопустимый (чрезмерный). Для того, чтобы привести уровень безопасности к приемлемому, достаточно свести фактор c_1 (обеспеченность финансовыми средствами) к среднему уровню Safety=0.50, или фактор b_3 (интенсивность неисправностей) тоже к среднему уровню Safety=0.50.

Результат нечёткой оценки уровня безопасности эксплуатации группы ЛА в пакете FuzzyTech приведен на рис. 5.

Уровень безопасности эксплуатации группы ЛА – низкий (Safety=0.35), риск недопустимый (чрезмерный). Для того, чтобы привести уровень безопасности к приемлемому, достаточно свести фактор c_1 (обеспеченность финансовыми средствами) к среднему уровню Safety=0.50, или фактор b_3 (интенсивность неисправностей) тоже к среднему уровню Safety=0.50.

Как было показано ранее, часто рассуждения о взаимодействии факторов являются нечеткими, приблизительными. Но тогда и полученный вывод будет также приблизительным. В работе

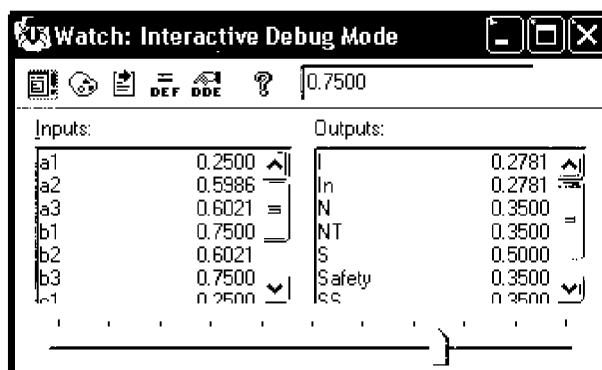


Рис. 5. Результат оценки уровня безопасности

[11] предложен механизм оценки уровня уверенности в получаемых выводах на основе когнитивной модели.

Оценка уровня уверенности в представленном на рис. 5 результате расчета уровня безопасности эксплуатации группы ЛА, получена с помощью компьютерной системы концептуального моделирования неструктурированных ситуаций “Канва”.

Интервалы значений консонанса в системе “Канва” имеют лингвистическую интерпретацию типа “Невозможно”, “Возможно”, “Достоверно” и т.д.

Для определения силы взаимовлияния факторов N, I, S в системе моделирования была использован модуль извлечения предпочтений эксперта. В этом модуле в качестве исходной информации использовалась информация о лингвистических значениях факторов ситуаций и знаковый граф ситуации, введенные в модуль представления субъективной информации (рис. 6). Исходная информация (рис. 5) использовалась системой для генерации вопросов эксперту, из ответов на которые извлекалась информация о силе причинных связей факторов ситуации.

В системе “Канва” определялась сила причинных связей между факторами в режиме прямого оценивания, как передаточный коэффициент, вычисляемый по известным отклонениям

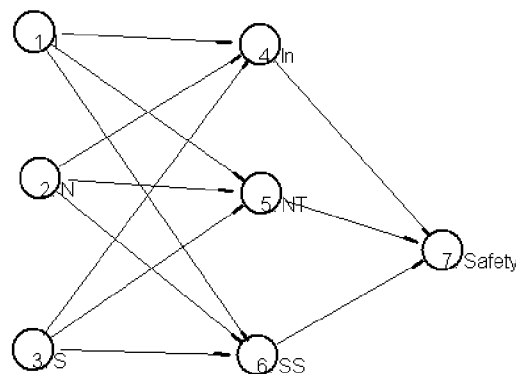
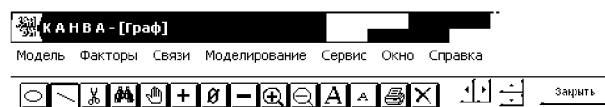


Рис. 6. Ориентированный граф подсистемы когнитивной модели в системе “Канва”

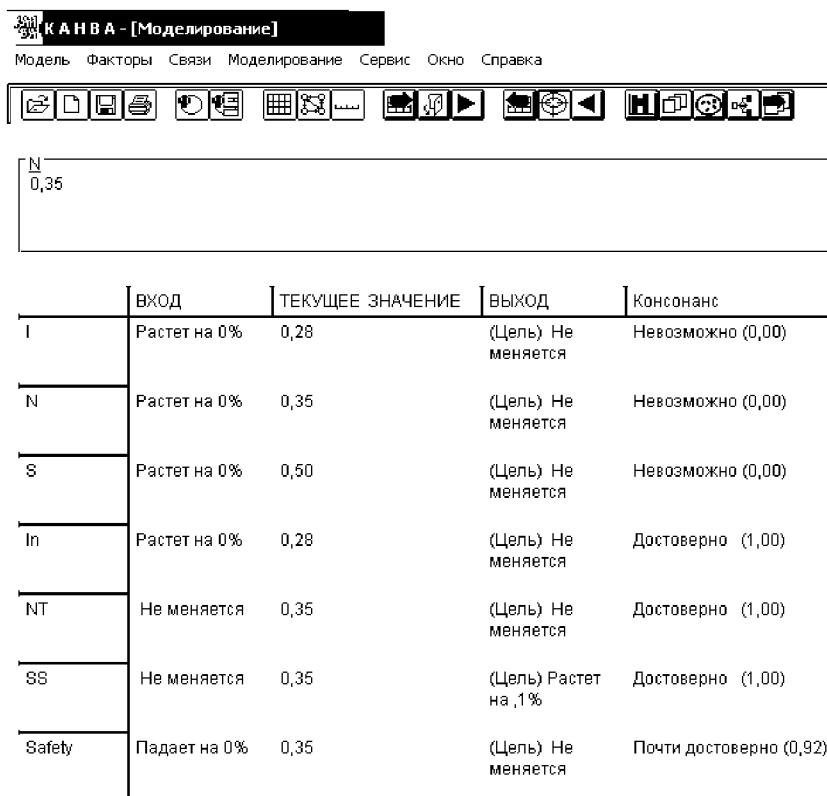


Рис. 7. Результат оценки консонанса при экспертно полученном низком уровне безопасности эксплуатации (Safety=0.35)

фактора причины и фактора следствия.

Результаты моделирования представлялись в виде двумерного массива (рис. 7), строки которого – значения одного фактора в последовательные моменты времени, столбцы – значения всех факторов в последовательные моменты времени. Информация из двумерного массива данных избирательно использовалась подсистемами представления результатов моделирования и поддержки аналитической деятельности эксперта.

Так как рассчитанное значение консонанса (рис. 7) близко к единице, то сделанный ранее вывод о низком уровне безопасности эксплуатации группы ЛА получен с высокой степенью уверенности.

Таким образом, использование функциональной когнитивной модели позволяет при известных исходных данных, полученных от экспертов, оценивать важнейший показатель системы эксплуатации – уровень ее безопасности. При этом результат формируется на содержательном уровне, на основе логики, накопленного опыта и интуиции. Также обоснованная на основе выбора базовых факторов, разработки процедурных правил нечеткого вывода и использования возможностей пакета прикладных программ Fuzzy Tech когнитивная модель позволяет не только решать собственно задачу оценки безопасности, но и изучать конструктивные свойства таких моделей.

Проведенное моделирование показало, что увеличение числа термов приводит к тому, что связь результата и базовых факторов стремится к фрактальной. При моделировании с расширенным составом базовых факторов (больше 9, представленных на рис. 1) обнаружен фрактал в функциональной связи числа базовых факторов N с числом n решающих факторов, которых достаточно для идентификации. Отсюда следует, что увеличение мощности множества базовых факторов приводит к росту числа решающих факторов, которых тем ни менее, значительно меньше числа базовых. Последнее важно из-за того, что большое количество базовых факторов затрудняет разработку когнитивной модели на базе нечеткой логики из-за объемных блоков процедурных правил нечеткого вывода. Кроме того, моделирование показало, что при наличии слабо формализуемых переменных (типа ошибок персонала, неточностей документации и т.п.), задаваемых в классической постановке часто дихотомически (да, нет), результаты оценки безопасности по FCM – моделям и с использованием полумарковских моделей будут существенно отличаться.

Для количественной оценки изменения уровня полноты Δ ДЛИС было проведено моделирование на разработанной когнитивной модели для случаев вариаций “установленного интервала” времени эксплуатации - фактор s_2 - неадекват-

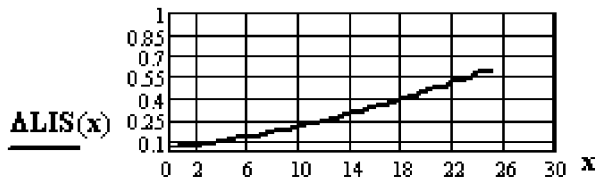


Рис. 8. Зависимость изменения полноты безопасности эксплуатации от вариаций степени продления гарантийных сроков (%)

ность степени продления гарантийных сроков и обеспеченности финансовыми средствами - фактор s_1 . В результате получены количественные оценки, приведенные на графиках рис. 8, 9.

Из графиков видно, что использование разработанной методики оценки безопасности эксплуатации АТ в послегарантийный период может приводить к существенному (0,45...0,60) повышению полноты безопасности в зависимости от значений факторов опасности x .

Как правило, сложная техническая система характеризуется ограниченным множеством наиболее информативных признаков. В наблюдениях за системой имеются симметрии, выражающиеся в инвариантности её облика к множеству естественных преобразований, типичных для условий эксплуатации (длительность эксплуатации, безопасность, экономичность, эффективность и др.), и приводящие к кластерам инвариантов – однородным по характерным признакам областям.

Полагая, что образы объектов, получаемые в наблюдениях, имеют подобные инварианты, можно представить модель системы эксплуатации АТ в виде матрицы, каждая строка которой задаётся последовательностью пар чисел, например, интенсивностью потока отказов и числом элементов строки матрицы, имеющих такую интенсивность. Требование конструктивности приводит к необходимости знания количества кластеров с постоянной в среднем интенсивностью потока отказов, характера распределения интенсивности в каждом кластере. Ответы связываются с множеством объектов с упорядоченной интенсивностью, называемом формой системы. Полагается, что естественно искать формы в среде систем, обладающих свойствами больших разнообразия и стабильности. В работе [12] показывается, что наибольшим разнообразием и стабильностью обладают системы, форма которых связана с распределениями Ципфа–Парето, т.е. фрактальные системы. В том, что система эксплуатации АТ в послегарантийный период фрактальна, заключается смысл гипотезы фрактальности.

Фрактальная гипотеза позволила решить задачу определения функциональной связи числа базовых факторов с числом решающих факто-

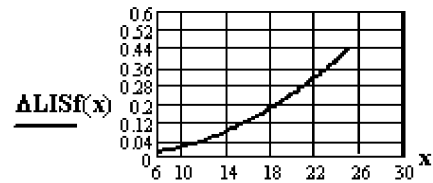


Рис. 9. Зависимость изменения полноты безопасности эксплуатации от вариаций обеспеченности финансовыми средствами (%)

ров, достаточных для идентификации ситуации в период послегарантийной эксплуатации АТ и получить фрактальные ранговые соотношения определения времени стабильной динамики эксплуатации АТ, позволяющие получить количественно возможные времена продления сроков службы АТ.

В работе [13] получено соотношение для времен циклов при ранговом фрактальном распределении, адаптированное к возможности использования при оценке безопасности эксплуатации АТ в послегарантийный период.

$$T_1 = [\gamma \ln(r_{max})] / a_1, \quad T_2 = [\gamma \ln(r_{max})] / a_2, \quad (5)$$
 где T_1 и T_2 – наибольшие возможные значения времен циклов, r_{max} – максимальный ранг, $\gamma = 1/d - 1$, d – фрактальная размерность. Критерий оценки наличия свойств персистентности системы: $a_1 > 0$ и $a_2 < 0$. Для определения неизвестных параметров γ, r_{max}, a_1 в выражении (5), необходимо добавить модель, построенную на основе данных – результатов натурных экспериментов (мониторинга).

Полученные выражения для времен циклов позволяют увеличить конструктивность методики за счет определения продолжительности состояния безопасной эксплуатации АТ, а также в отличие от традиционного основанного на определении долговечности подхода дают возможность оценивать время цикла не только отдельных подсистем, но и всей системы в целом.

Таким образом, представленная методика оценки безопасности эксплуатации АТ в послегарантийный период может быть использована для принятия решений экспертами по определению входных факторов разработанной нечеткой когнитивной модели оценки уровня безопасности, оценки полноты безопасности эксплуатации АТ в послегарантийный период при слабо формализуемой исходной информации, а также, для формулирования количественных рекомендаций по возможному увеличению срока службы АТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арепьев А.Н., Громов М.С., Шапкин В.С.* Вопросы эксплуатационной живучести авиаконструкций. М.: Воздушный транспорт, 2002. 424 с.
2. *Мышкин Л.В.* Прогнозирование развития авиационной техники. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 304 с.

3. Анцелиович Л.Л. Надежность, безопасность и живучесть самолета. М.: Машиностроение, 1985. 296 с.
4. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М.: Высшая школа, 1981.
5. Куликов Г. Г., Флеминг П.Дж., Брейкин Т.В., Арьков В.Ю. Марковские модели сложных динамических систем: идентификация, моделирование и контроль состояния (на примере цифровой САУ ГТД). Уфа: УГАТУ, 1998. 103 с.
6. Миронов В.В., Ситчихин А.Н. Иерархические ситуационные модели с предысторией // Управление в сложных системах. Уфа, 1999. С.55-68.
7. Есипов Ю.В. Возможностная оценка отказов в нечеткой системе "факторы-объект" // АиТ. 2002. № 1.
8. Алтушин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография. Тюмень: Тюменский государственный университет, 2000. 352 с.
9. Коханенко И.К., Москаев В.А. Когнитивная модель оценки безопасности послегарантийной эксплуатации сложных технических систем // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2010. Выпуск 4. Т. 17. С. 566-568.
10. Декларация Российского научного общества анализа риска и об установлении предельно допустимого уровня риска. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sra-russia.ru/> (дата обращения 2.08.2012).
11. Кулинич А.А. "Методология когнитивного моделирования сложных плохо определенных ситуаций". Вторая международная конференция по проблемам управления (17-19 июня 2003 г., ИПУ РАН, Москва 2003 г.). Избранные труды. Т.2. С.219-226. URL: <http://www.raai.org/about/persons/kulinich/pages/mkmp2003.doc> (дата обращения 2.08.2012).
12. Коханенко И.К. Фрактальная топология и динамика экономических систем. // Экономика и математические методы. 2007. Т. 43. № 1.
13. Коханенко И.К., Москаев В.А. Оценка времени стабильности фрактальных структур // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2010. Выпуск 4. Т. 17. С. 568-570.

METHOD FOR VALUE THE SAFETY OF AVIATION TECHNIQUE EXPLOITATION AFTER THE WARRANTY PERIOD

© 2012 V.A. Moskaev

Military Aviation Engineering University, Voronezh

This article describes method for value the safety of aviation technique exploitation after the warranty period, based on the fuzzy cognitive model, fractal hypothesis and the ratio for cycle time rank fractal distribution. This method allows to determine with estimated assurance the safety level and service aviation techniques life after the warranty period by the monitoring results of exploitation system and expert information.

Keywords: safety, aviation technique, fuzzy cognitive model, the fractal hypothesis, the cycle time.