

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 629.78

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ РИСКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Донсков А.В.

*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва,
ул. Ленина, 4А, Королёв, Московская обл., 141070, Россия
e-mail: aleksej_ne@mail.ru*

Рассмотрены современные методы оценки и моделирования рисков возникновения нештатных ситуаций на борту космического аппарата (КА). Выявлена и обоснована необходимость применения математических моделей в управлении полетом космическим аппаратом. На основе проведенного анализа автор предлагает использовать следующие методы: логико-лингвистический и теорию нечетких множеств. Данные методы позволяют выстроить сценарии развития нештатных ситуаций на борту КА и дать оценку риска возникновения в условиях нечеткой информации о текущей ситуации на борту КА.

Ключевые слова: космический аппарат, риск, моделирование рисков, анализ состояния, полёт, управление полетом космического аппарата, нештатная ситуация.

Введение

Приоритетной задачей оперативного управления полетом космического аппарата на всех этапах его полета является обеспечение высокого уровня безопасности как экипажа, так и КА. В настоящее время под управлением полетом КА понимается процесс управления параметрами состояния бортовых систем КА (последовательное изменение одних и поддержание в определенных пределах других), направленное на достижение цели полета [1]. Для того чтобы в ходе полета КА правильно принимать решения об изменении текущего состояния бортовых систем с помощью управляющих воздействий, необходимо всесторонне оценить его и прогнози-

ровать дальнейшие его изменения. Но следует отметить, что в ходе полета текущее состояние КА может изменяться под действием внешних факторов (агрессивная внешняя среда, физические воздействия и т.д.), что ведет к негативным последствиям. Такие ситуации называются нештатными.

В настоящее время нештатные ситуации (НШС) классифицируются в зависимости от степени тяжести последствий, к которым они могут привести, если не будут вовремя ликвидированы [2, 3].

НШС делятся на следующие виды:

- катастрофические (возникают в результате неустраняемых отказов и приводят к гибели экипажа или его травмированию с утратой работоспособно-

сти либо к потере одного из жизненно важных элементов КА и неспособности выполнять дальнейшие операции полета). К катастрофическим ситуациям относится и утрата возможности управления полетом;

- критические (приводят к длительной потере функций или элементов КА либо к травмированию экипажа без потери его работоспособности или влияют на физическую целостность и безопасность КА, их последствия могут быть устранены вмешательством экипажа или главной оперативной группы управления);

- некритические (не несут в себе указанных признаков критических и катастрофических НШС).

В зависимости от возможного выхода из НШС они подразделяются на два вида:

- расчетные (выход из которых возможен);
- нерасчетные (выход из которых невозможен либо маловероятен).

С целью парирования нештатных ситуаций лицо, принимающее решение (ЛПР), действует по соответствующему алгоритму. Алгоритм парирования НШС является отработанным и включает устоявшуюся последовательность действий (обнаружение и идентификация НШС, подготовка исходных данных для принятия решения по парированию НШС, принятие решения), выполняемых как аппаратно-программными средствами, так и специалистами группы управления [4].

На процесс парирования НШС оказывают влияние следующие факторы:

- ограниченность времени на принятие решения по парированию НШС и виду НШС;
- высокая динамика протекающих процессов;
- многокритериальность оценки текущего состояния КА;
- наличие источников неопределенности (недоверенная телеметрическая информация, разное восприятие текущего состояния КА специалистами группы управления и т.д.).

Вышеуказанные факторы определяют пути совершенствования алгоритма парирования НШС с помощью математических методов. Одним из основных количественным показателем текущего состояния КА является риск возникновения нештатной ситуации на борту КА. Но с учетом специфики технической области выполнить натурные испытания для оценки риска возникновения НШС не представляется возможным. В то же время априорные оценки рисков НШС на борту КА не всегда являются достоверными из-за неопределенности, источником которой является человеко-машинная система. Под человеко-машинной системой понимается следующая система: «специалист группы

управления — космический аппарат — среда» (СГУ-КА-С).

В статье представлен обзор современных методов оценки и моделирования рисков возникновения нештатных ситуаций на борту КА. Использование математических методов значительно расширяет возможности и повышает эффективность действий группы управления полетом в процессе оперативного управления полетом КА.

Современные методы оценки и моделирования рисков возникновения нештатных ситуаций на борту КА

Теория систем опирается на процедуры анализа и синтеза данных [5, 6], а также содержит математический аппарат, который позволяет не только обосновать алгоритмы многокритериального принятия решения с целью минимизации рисков, но и использовать экспертные оценки и логические подходы. Важным аспектом является построение адекватной модели, которая будет отражать задачи исследования, полноту знания об объекте управления и процессах, характеристику среды (внешней и внутренней) с учетом воздействующих факторов. Однако формализованные подходы лишают возможности использовать семантические связи. Таким образом, моделирование человеко-машинной системы (СГУ-КА-С) содержит многошаговую процедуру перехода от вербального портрета объекта управления к логико-лингвистическим представлениям и аналитическим математическим описаниям, включая имитационное [7, 8].

Рассмотрим существующие методы оценки и моделирования рисков.

Детерминистический метод

Детерминистический метод заключается в том, что процесс управления полетом КА считается неопределенным (зачастую вероятностным), а четко детерминированным, в основе его лежат причинно-следственные сценарии развития нештатных ситуаций, отказов и т.д. Такие модели строятся по упрощенной схеме, не учитываются всякого рода случайности. Основным является принцип причинности: одно событие (причина) при определенных условиях порождает другое событие (следствие).

Детерминистический подход в управлении полетом КА основывается полностью на определенных исходных данных о параметрах воздействия и свойствах объекта управления с установленными критическими значениями контролируемых телеметрических параметров. Наглядность и простота, не требующая сложных математических методов описания объекта управления, является достоин-

ством данного метода. Но пренебрежение случайными факторами не позволяет получить адекватные оценки. Также проблематичной представляется процедура получения интегральных показателей, например распространенным способом «линейной сверстки» вида:

$$L = \sum l_i w_i, \quad (1)$$

где l_i — некая экспертная оценка параметра телеметрической информации;

w_i — вес показателя.

Применение метода недостаточно правомерно, так как компоненты человекомашиной системы являются не однотипными (имеют различную физическую природу). Следовательно, выполнять процедуру «осреднения» нет никакого смысла [9].

Статистический метод

Статистический метода анализа риска возникновения НШС на борту КА основан на обобщении информации об их возникновении за всё время летных испытаний. То есть статистическая модель представляет некое аналитическое выражение, в котором учитывается влияние случайных факторов в ходе функционирования системы СГУ-КА-С. В модели применяются количественные критерии для оценки повторяющихся событий и учитываются динамика изменения их во времени, а также случайные возмущающие факторы внешней среды.

Таким образом, статистическая модель может быть охарактеризована уровнем неопределенности знаний об объекте изучения. Эти знания могут быть восполнены в результате сбора и анализа исходных данных.

Применение методов математической статистики может вскрыть некие закономерности, характерные для больших выборок однородных событий. При возникновении неоднородных событий различной природы статистические методы могут быть использованы после предварительной систематизации (кластеризации) нештатных ситуаций, например по степени критичности или видам.

Следовательно, вероятность НШС за определенный интервал времени Δt можно определить через частоту их возникновения в виде потока случайных событий, которые обладают следующими свойствами: в короткий промежуток времени происходит не более одной НШС; отсутствие последствий и стационарность.

При наличии этих условий поток НШС можно рассматривать в виде пуассоновского потока, для которого число n НШС, возникающих в течение времени t , распределено по закону Пуассона [10]:

$$F(N) = P(n < N) = \sum_{k=0}^N P(k), \quad (2)$$

где $P(k) = \alpha(\Delta t)^k e^{-\alpha(\Delta t)}$ — вероятность НШС в промежуток времени Δt ; $\alpha(\Delta t) = \gamma \Delta t$ — параметр распределения Пуассона; γ — частота (среднее число НШС за короткий промежуток времени).

Необходимо отметить, что применение нормального распределения целесообразно только при наличии не менее 100 однородных данных.

Для повышения точности оценок необходим большой объем статистических данных, который может быть дополнен с каждым полетом КА. Но при наличии таких обстоятельств, как, например, неконтролируемые факторы, приводит к неоднородности статических данных и, как следствие, к появлению статической неопределенности, которая ведет к увеличению погрешности оценок риска и ограничивает область применения данного метода. Обработка данных, полученных в результате полета космического корабля, может быть выполнена с помощью разных видов анализа (кластерный, факторный, корреляционный и др.).

Вероятностно-статистический метод

Данный метод основывается на выполнении вероятностного анализа риска возникновения НШС в системе Ч-КА-С. То есть вероятность возникновения НШС рассчитывается исходя из статистических данных. В этом случае риск возникновения НШС может быть определен в виде апостериорной и априорной оценки. Апостериорная оценка основывается на использовании понятия «частота возникновения НШС», которое было ранее описано. Для прогноза возникновения аномальной ситуации, которая приводит к НШС, используется априорная оценка. В этом случае априорная оценка оперирует термином «вероятность». Таким образом, частота возникновения НШС носит вероятностный характер, при этом вероятность понимается как возможность [11].

Теоретико-вероятностный метод

В основе теоретико-вероятностного метода лежит стохастический (случайный) процесс возникновения нештатных ситуаций. Оценка вероятности нештатной ситуации выполняется от выявления (идентификации) первоначальных событий, которые инициировали развитие НШС, до построения графиков. Математические модели имеют более простой вид по сравнению с детерминистическими моделями расчета. Применение вероятностно-

го анализа риска ограничено недостатком статистической информации по нештатным ситуациям в бортовых системах КА и отсутствием функции распределения телеметрических параметров, которые описывают функционирование бортовых систем отдельно и в совокупности [12].

Логико-лингвистический метод

Для логико-лингвистического метода анализа риска возникновения НШС на борту КА характерна формализация, которая использует символичный язык логики и теорию графов [13].

Для определения достоверности нештатной ситуации может быть применён один из видов логико-лингвистической модели — сценарный. Сценарный подход опирается на функции алгебры логики, т. е. используются булевы функции для описания события (1 — истина, 0 — ложь).

Таким образом, сценарий возникновения НШС выражается в виде взаимосвязанных состояний системы СГУ-КА-С, которые возникают последовательно во времени. Применяется семантическое и логико-лингвистическое моделирование для оценки рисков возникновения НШС на борту КА.

Метод имитационного моделирования

Данный метод основывается на логико-математическом описании человеко-машинной системы в виде динамической. Этот вид моделей используется в случае невозможности строгого аналитического решения задачи или проведения натурных экспериментов. Для человеко-машинной системы (в нашем случае СГУ-КА-С), для которой характерны неопределенности и стохастичность, имитационное моделирование является единственным инструментом анализа. Может быть использована любая информация в комбинации с эвристическими неточными оценками, которые были получены эмпирическим путем. Метод имитационного моделирования применяется для анализа сложных систем, описывающих объекты повышенной опасности [14].

Экспертный метод

Экспертный метод основывается на применении знаний и опыта экспертов и специалистов предметных областей. Данный метод может быть применен при отсутствии статистических данных по объекту управления или когда нет возможности выбрать адекватную математическую модель [15].

Для оценки риска возникновения НШС в системе СГУ-КА-С экспертный метод использует оценочные шкалы. Суждения экспертов представляются в виде качественных характеристик или вероят-

ностей нештатных ситуаций, которые свойственны определённым периодам времени.

Алгоритм экспертного метода широко применяется [16]. Он заключается в том, что результаты экспертных оценок являются случайными величинами. Например, каждый эксперт задает значение возможных негативных последствий с указанием вероятности их возникновения. Мы получим распределение дискретной случайной величины, которое отражает точку зрения экспертов относительно прогноза рассматриваемой величины:

$$M_i(\tau) = \sum_{j=1}^N M_j \frac{\tau}{S_j}, \quad (3)$$

где S_j — информация для j -го эксперта.

В случае отсутствия достоверных статистических данных в экспертном методе могут быть использованы лингвистические оценки. Это позволяет получить интегральную оценку риска возникновения НШС на борту КА в многомерном векторном пространстве.

Недостатками данного метода являются сложность в организации сбора данных от экспертов и обработки данных, а также сомнительная достоверность оценок. Для минимизации влияния недостатков можно использовать алгоритмы и процедуры снижения субъективности, свойственной итоговым оценкам риска [16].

Метод нечетких множеств

Метод нечетких множеств принадлежит к классу логических моделей. Основой данного метода является языковое выражение в виде «высказывания», смысл которого заключается в утверждении, истинно оно или ложно [17]. Логические модели находят применение в различных предметных областях, где необходимо описать системы знаний, в частности в области управления полетом КА.

Особенности применения теории нечетких множеств (ТНМ) [18—21]:

- сбор и обработка данных, описывающих текущее состояние КА, связано с анализом значительных объёмов информации;

- в отличие от традиционных методов анализа рисков, ТНМ не требует априорной информации о НШС в объекте управления.

Обработка информации выполняется с помощью алгоритмов логического вывода. То есть оценка рисков системы СГУ-КА-С делается следующим образом:

- проводится логико-математическое моделирование;

- определяется множество рискообразующих факторов;

— определяются управляющие воздействия и обратные связи;

— вводится градация степени рисков (например, высокий, средний, низкий и т.д.);

— строится логический нечеткий вывод, определяются альтернативы.

Данный метод позволяет определить интегральный риск возникновения НШС на борту КА и интегральную характеристику текущего состояния КА, что дает возможность принять решения о предотвращении или остановке развития НШС на борту КА.

Выводы

Перечень рассмотренных методов оценки и моделирования рисков НШС на борту не является исчерпывающим. Выбор того или иного метода зависит от решаемой задачи. Накопленный опыт управления полетом в пилотируемой космонавтике показывает, что наибольший интерес вызывают методы оценки и моделирования рисков НШС на борту КА, которые позволяют определить возможные варианты развития НШС и ее последствия. Такими методами являются логико-лингвистический метод и метод нечетких множеств. Они могут быть использованы в качестве инструментов как в системах поддержки принятия решения по парированию нештатных ситуаций на борту КА, так и в экспертных системах.

Библиографический список

1. *Кравец В.Г., Любинский В.Е.* Основы управления космическими полётами. — М.: Машиностроение, 1983. — 224 с.
2. *Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е.* Управление космическими полетами: Учеб. пособие в 2 частях. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. Ч. 2. — 426 с.
3. *Соловьев В.А., Любинский В.Е., Матюшин М.М.* Проблемы управления полетами пилотируемых космических комплексов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2013. № 3. С. 39-52.
4. *Донсков А.В., Мишурова Н.В., Соловьев С.В.* Автоматизированная система контроля состояния космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 3. С. 151-160.
5. *Л. фон Берталанфи.* Общая теория систем: критический обзор // Исследования по общей теории систем. М.: Прогресс, 1969. С. 23-82 (520 с.).
6. *Месарович М., Такахара Я.* Основания общей теории систем // Общая теория систем: математические основы / Под ред. С. В. Емельянова. М.: Мир, 1978. — 312 с.
7. *Белов П.Г.* Теоретические основы системной инженерии безопасности. — М.: ГНТБ Безопасность, 1996. — 424 с.
8. *Обухов Ю.В., Попов А.С., Орлов А.С., Котова А.О.* Применение имитационного моделирования для оценки безопасности полетов // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57729>
9. *Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н.* Общая теория рисков: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. — 2-е изд., испр. — М.: Академия, 2008. — 368 с.
10. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. — М.: Советское радио, 1972. — 551 с.
11. *Дюбуа Д., Прад А.* Теория возможностей. Приложение к представлению знаний в информатике: Пер. с франц. — М.: Радио и связь, 1990. — 288 с.
12. РМГ 91-2009. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы. — М.: Издательство стандартов, 2010. — 81 с.
13. ГОСТ 21878-76. Случайные процессы и динамические системы. — М.: Издательство стандартов, 1976. — 45 с.
14. *Гражданкин А.И.* Экспертная система оценки техногенного риска опасных производственных объектов // Безопасность жизнедеятельности. 2001. № 2. С. 6-10.
15. *Белешев С.Д., Гурвич Ф.Г.* Экспертные оценки. — М.: Наука, 1973. — 161 с.
16. *Хенли Э.Дж., Кумамото Х.* Надежность технических систем и оценка риска. — М.: Машиностроение, 1984. — 528 с.
17. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. — М.: Мир, 1976. — 165 с.
18. *Поспелов Д.А.* Логико-лингвистические модели в системах управления. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 231 с.
19. *Гаврилова Т.А.* Логико-лингвистическое управление как введение в управление знаниями // Новости искусственного интеллекта. 2002. №6. С. 45-60.
20. *Борисов А.Н., Алексеев А.В., Крумбер О.А.* Модели принятия решений на основе лингвистической переменной. — Рига: Зинатие, 1982. — 256 с.
21. *Донсков А.В.* Лингвистическое моделирование анализа рисков возникновения аварийной ситуации на борту пилотируемого космического аппарата на примере системы обеспечения температурного режима на Российском сегменте Международной космической станции // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 5(23). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-05-1488

ANALYSIS OF MODERN EVALUATION AND MODELING METHODS OF CONTINGENCIES OCCURRENCE RISKS ONBOARD A SPACECRAFT

Donskov A.V.

*Rocket and Space Corporation "Energia" named after S.P. Korolev,
4, Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia
e-mail: aleksej_ne@mail.ru*

Abstract

The purpose of the article consists in analysis of modern evaluation and modelling methods of contingencies occurrence onboard a spacecraft and substantiation of methods selection for their subsequent application in the process of operative flight control. The process of the aircraft flight control while contingencies occurrence onboard a spacecraft (time limitation for the decision making on contingencies parrying and their type, high dynamics of the processes flow, multicriteriality of the spacecraft current state, the presence of sources of uncertainty) was studied. The inference was drawn, that all considered methods of the onboard contingencies risks evaluation and modelling were not exhaustive. Depending of the current situation, any of the considered methods and on account of the problems being solved could be employed for the contingency risk occurrence onboard a spacecraft evaluation and modelling. The accumulated experience of flight control in manned astronautics revealed that the most interest was provoked by those methods of contingencies risks evaluation and modelling, which reflect the ways of their evolution and aftermath. The selection of the contingencies occurrence risks onboard a spacecraft methods (logic-linguistic and theory of fuzzy sets) is being substantiated by the fact that it allows develop scenarios of the contingencies occurrence onboard a spacecraft and prepare initial data for the decision making on contingencies parrying in case of uncertainty. Methods of contingencies occurrence risks onboard a spacecraft considered in the article may be implemented as tools both in the systems for decision making support on contingencies onboard a spacecraft parrying and in expert systems.

Keywords: spacecraft, risk, risks modelling, state analysis, flight, spacecraft flight control, contingency.

References

1. Kravets V.G., Lyubinskii V.E. *Osnovy upravleniya kosmicheskimi poletami* (Space flight control fundamentals), Moscow, Mashinostroenie, 1983, 224 p.
2. Solov'ev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskii V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* (Space flight control), Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2010, part 2, 426 p.
3. Solov'ev V.A., Lyubinskii V.E., Matyushin M.M. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Mashinostroenie*, 2013, no. 3, pp. 39-52.
4. Donskov A.V., Mishurova N.V., Solov'ev S.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 151-160.
5. L. von Bertalanffy. *General System Theory*. New York, George Braziller, 1968, 289 p.
6. Mesarovic M.D., Takabara Ya. *General systems theory: mathematical foundations*. New York – San Francisco – London, Academic Press, 1975, 279 p.
7. Belov P.G. *Teoreticheskie osnovy sistemnoi inzhenerii bezopasnosti* (Theoretical basics of system safety engineering), Moscow, GNTB Bezopasnost', 1996, 424 p.
8. Obukhov Yu.V., Popov A.S., Orlov A.S., Kotova A.O. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57729>
9. Vishnyakov Ya.D., Radaev N.N. *Obshchaya teoriya riskov* (General theory of risks), Moscow, Akademiya, 2008, 368 p.
10. Venttsel' E.S. *Issledovanie operatsii* (Operations research), Moscow, Sovetskoe radio, 1972, 551 p.
11. Dubois D., Prade A. *Théorie des possibilités: Applications à la représentation des connaissances en informatique*, Masson, Paris, 1988, 292 p.
12. *RMG 91-2009. Rekomendatsii po mezhgosudarstvennoi standartizatsii. Sovmestnoe ispol'zovanie ponyatii "pogreshnost" izmereniya" i "neopredelennost" izmereniya". Obshchie printsipy* (Recommendations on interstate standardization. Joint use of the concepts of "measurement error" and "measurement uncertainty". General principle. RMG 91-2009), Moscow, Standarty, 2010, 81 p.
13. *Sluchainye protsessy i dinamicheskie sistemy. GOST 21878-76* (Random processes and dynamic systems. State Standard 21878-76), Moscow, Standarty, 1976, 45 p.
14. Grazhdankin A.I. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2001, no. 2, pp. 6-10.
15. Beleshev S.D., Gurvich F.G. *Ekspertnye otsenki* (Expert evaluations), Moscow, Nauka, 1973, 161 p.

16. Henley E.J., Kumamoto H. *Reliability engineering and risk assessment*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, New Jersey, 1981, 568 p.
17. Zadeh L.A. *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning*. American Elsevier Publishing Company, New York, 1973.
18. Pospelov D.A. *Logiko-lingvisticheskie modeli v sistemakh upravleniya* (Logical-linguistic models in control systems), Moscow, Energoatomizdat, 1981, 231 p.
19. Gavrilova T.A. *Novosti iskusstvennogo intellekta*, 2002, no. 6, pp. 45-60.
20. Borisov A.N., Alekseev A.B., Krumber O.A. *Modeli prinyatiya reshenii na osnove lingvisticheskoi peremennoi* (Decision making models based on linguistic variable), Riga, Zinatie, 1982, 256 p.
21. Donskov A.V. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2016, no. 5(23). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-05-1488