

УДК 62-91:004.023

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГРАНИЦ ОБЛАСТИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
НА СТАДИЯХ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

¹Миронов А.Н., ¹Миронов Е.А., ²Шестопалова О.Л., ¹Платонов С.А.

¹ФГОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,
Санкт-Петербург, e-mail: vka@mil.ru;

²Филиал «Восход» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)» в г. Байконуре

В данной статье представлено обоснование нечёткого подхода к определению границ поля допуска параметров технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов на стадиях создания и эксплуатации. Принимая во внимание высокую степень неопределённости информации об условиях эксплуатации бортовой аппаратуры космических аппаратов, исключающую возможность применения математического аппарата теории вероятности и математической статистики, а также нечёткость субъективных представлений, суждений специалистов-экспертов, границы области работоспособности бортовой аппаратуры космических аппаратов предложено описывать нечёткими множествами, функции принадлежности которых оцениваются на основе формализованного представления опыта экспертов с помощью нечетких лингвистических шкал. Это позволит при прогнозировании надёжности и живучести космических аппаратов учесть априорную информацию о степени влияния факторов неблагоприятных воздействий на элементы бортовой аппаратуры.

Ключевые слова: техническое состояние, качество функционирования, нечёткие экспертные данные

**RESEARCH OF QUESTIONS MODELING OF BORDER AREAS
FUNCTIONING ELEMENTS OF ONBOARD EQUIPMENT SPACECRAFT
AT THE STAGE OF CREATION AND OPERATION**

¹Mironov A.N., ¹Mironov E.A., ²Shestopalova O.L., ¹Platonov S.A.

¹Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg, e-mail: vka@mil.ru;

²A Branch «Voskhod» of the Moscow aviation institute (national research university) in Baikonur

This article presents the rationale fuzzy approach to the definition of the boundaries of the tolerance parameters of the technical condition of the equipment onboard spacecraft in the stages of creation and operation. Taking into account the high degree of uncertainty of information about the operating conditions of the onboard equipment of space vehicles, excluding the possibility of using the mathematical apparatus of the theory of probability and mathematical statistics, and blurred subjective perceptions, judgments, professional experts, the boundaries of the area health boarding equipment spacecraft proposed to describe the fuzzy sets, membership functions are estimated on the basis of formalized representation of the experience of experts by means of fuzzy linguistic scales. This will help in predicting the reliability and survivability of the spacecraft to take into account a priori information about the degree of influence of factors of adverse effects on the elements of onboard equipment.

Keywords: technical condition, operation quality, fuzzy expert data

К настоящему моменту времени установлено, что современные комплексы методического и алгоритмического обеспечения обработки результатов телеметрического контроля бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов (КА) обладают рядом ключевых недостатков, одним из которых является несовершенство методик назначения границ полей допусков (ГПД) на параметры технического состояния (ТС) БА КА, которые обычно задаются постоянными величинами, определяемыми по принципу наихудшего сочетания наиболее неблагоприятных факторов условий эксплуатации. Кроме того, недостаточно проработаны вопросы обоснования значений ГПД параметров ТС элементов и подсистем БА КА для ситуаций воздействия на КА естественных

и преднамеренных факторов с уровнями, превышающими среднестатистические.

Цель исследования

В данной статье представлено обоснование нечёткого подхода к определению ГПД параметров ТС БА КА на этапе проектирования и эксплуатации. Границы области работоспособности БА КА предложено описывать нечёткими множествами, функции принадлежности которых оцениваются на основе формализованного представления опыта экспертов с помощью нечетких лингвистических шкал. Это позволит при прогнозировании надёжности и живучести КА учесть априорную информацию о степени влияния факторов неблагоприятных воздействий на БА КА.

Материалы и методы исследования

Пусть качество выполнения заданных функций БА КА оценивается некоторым скалярным показателем качества функционирования $K_{\text{кф}}$. Задано пороговое значение $K_{\text{кф}}^{\text{доп}}$, относительно которого справедливо следующее утверждение: если выполнено условие

$$K_{\text{кф}} \geq K_{\text{кф}}^{\text{доп}}, \quad (1)$$

элемент БА находится в работоспособном состоянии, в противном случае он неработоспособен. В общем случае задача прогнозирования ТС в широком смысле сводится к предсказанию в будущие моменты или интервалы времени различных показателей качества элемента БА КА, связанных с моментом нарушения выполнения условия (1). Назовём событие, заключающееся в нарушении условия (1), отказом элемента в широком смысле, а состояние элемента, при котором условие (1) выполнено, соответственно работоспособным состоянием в широком смысле.

Основная трудность в применении такого подхода в задачах анализа параметрической надёжности заключается в том, что показатель качества функционирования $K_{\text{кф}}$ невозможно, как правило, непосредственно измерить в процессе эксплуатации БА КА. Возникает необходимость найти способ проверки выполнения условия (1), не вычисляя значение $K_{\text{кф}}$. Одним из способов решения этой задачи является следующий.

Необходимо найти такой показатель ρ , который связан с $K_{\text{кф}}$ известной (доступной определению) однозначной зависимостью и, кроме того, является наблюдаемым, т.е. измеримым в процессе испытаний (эксплуатации). Определив $P^{\text{доп}}$ как область значений этого показателя, для которых выполняется условие (1), можно сформулировать правило определения работоспособности элемента БА КА в виде условия:

$$(K_{\text{кф}} \geq K_{\text{кф}}^{\text{доп}}) \Leftrightarrow (\rho \in P^{\text{доп}}). \quad (2)$$

В качестве показателя ρ на практике целесообразно использовать вектор выходных параметров элемента $X_{<n>}$, удовлетворяющий требованию наблюдаемости. Значения вектора $X_{<n>}$, как известно, в каждый момент времени определяют техническое состояние БА КА. Однако, знания ТС элемента в такой трактовке, в общем случае, недостаточно для определения его работоспособности.

В задаче определения работоспособности [2, 3] всегда присутствуют два момента. Первый связан с описанием и определением технического состояния элемента, т.е. значений вектора $X_{<n>}$. Второй учитывает качество работы элемента при данном состоянии. Качество функционирования элемента БА КА зависит от состояния элемента и состояния среды функционирования. Обозначив данные состояния соответственно $S^{(0)}$ и $S^{(c)}$, можно записать

$$K_{\text{кф}} = f(S^{(0)}, S^{(c)}). \quad (3)$$

Состояние элемента $S^{(0)}$ определяется совокупностью значений его выходных параметров

$$S^{(0)} = X_{<n>} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle, \quad (4)$$

т.е. точкой в пространстве R^n . Состояние среды функционирования элемента $S^{(c)}$ обуславливается совокупностью условий эксплуатации и представляет собой m -мерный вектор

$$S^{(c)} = \Xi_{<m>} = \langle \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m \rangle, \quad (5)$$

где ξ_i , $i = \overline{1, m}$ – значение i -го фактора условий эксплуатации элемента. Таким образом, f есть некоторая функция векторов $S^{(0)}$ и $S^{(c)}$.

Для использования вектора $X_{<n>}$ в качестве показателя ρ в выражении (2) необходимо обеспечить однозначность отображения множества значений вектора $S^{(0)}$ на множество значений $K_{\text{кф}}$ в моменты оценивания ТС или на интервале утверждения при прогнозировании ТС. Это означает, что аргумент $S^{(c)}$ в функции (5.2) должен быть зафиксирован. Допустим, что существует возможность предсказания изменения вектора $S^{(c)}$ на интервале времени $T_{\text{упр}}$. Обозначим результат такого прогноза $\hat{S}^{(c)}(T)$ или $\hat{\Xi}_{<m>}(T)$. Тогда выражение (5.3) запишется в виде

$$K_{\text{кф}} = f(X_{<n>}, \hat{\Xi}_{<m>}(T)). \quad (6)$$

Подставив формулу (5.6) в левую часть (5.1), получим:

$$f(X_{<n>}, \hat{\Xi}_{<m>}(T)) \geq K_{\text{кф}}^{\text{доп}}. \quad (7)$$

Множество значений вектора $X_{<n>}$, удовлетворяющих условию (7), образуют в пространстве R^n некоторую связную область Q_p^n , называемую областью работоспособных состояний элемента БА КА (областью работоспособности). Критерием работоспособности элемента при этом является нахождение вектора $X_{<n>}$ в области Q_p^n

$$X_{<n>} \in Q_p^n | S^{(c)} = \hat{\Xi}_{<m>}(T), T \in [0, T_{\text{упр}}], \quad (8)$$

при условии известной функции изменения состояния среды функционирования на интервале $T_{\text{упр}}$. Данный критерий положен в основу определения работоспособности элемента БА КА в узком смысле, т.е. при некоторых сделанных допущениях о состоянии среды функционирования [5].

Область работоспособности Q_p^n принадлежит более широкой области устойчивого функционирования Q_ϕ^n . Областью устойчивого функционирования называется область изменения величин параметров x_i , $i = \overline{1, n}$, при которых не нарушается свойство функционирования элемента [1]. Условие устойчивого функционирования элемента можно записать

$$f(X_{<n>}, \hat{\Xi}_{<m>}(T)) > 0. \quad (9)$$

В соответствии с приведённым выше определением работоспособности элемента в узком смысле, отказом элемента БА КА в узком смысле является событие, заключающееся в нарушении условия (7). Это определение эквивалентно принятому в ГОСТ 27.002-89.

Для проверки выполнения условия (7) необходимо определить границы $Q_{p,r}^n$ области работоспособности Q_p^n . Для этого приравняем левую и правую части неравенства (7) и решим полученное уравнение

$$f(X_{<n>}, \hat{\Xi}_{<m>}(T)) = K_{\text{кф}}^{\text{доп}}$$

относительно $X_{<n>}$:

$$Q_{p,r}^n = \Phi(K_{\text{кф}}^{\text{доп}}, \hat{\Xi}_{<m>}(T)), \quad (10)$$

где $\Phi(K_{\text{кф}}^{\text{доп}}, \hat{\Xi}_{<m>}(T)) = f^{-1}(K_{\text{кф}}^{\text{доп}}, \hat{\Xi}_{<m>}(T))$.

Анализируя выражение (10), можно сделать вывод о зависимости границ области работоспособности от изменения условий эксплуатации элемента.

Можно выделить два основных подхода к определению границ области работоспособности: *стохастический и детерминированный*. Сущность *стохастического подхода* заключается в описании изменения условий эксплуатации элемента вектором случайных функций:

$$\hat{\Xi}_{<m>}(T) = \hat{\Xi}_{<m>}(T). \quad (11)$$

Границы области работоспособности $Q_{p,r}^n$ с учётом (5.11) определяются как случайная функция, изменяющаяся в пространстве R^n

$$\hat{Q}_{p,r}^n = \varphi(K_{\text{кф}}^{\text{доп}}, \hat{\Xi}_{<m>}(T)). \quad (12)$$

Стохастический подход к определению границ области работоспособности отражает реальный характер изменения $Q_{p,r}^n$ элемента БА КА в процессе эксплуатации, однако он обладает рядом недостатков:

- существуют объективные трудности получения информации о вероятностных характеристиках элементов вектора условий эксплуатации $\hat{\Xi}_{<m>}(t)$, обусловленные практической невозможностью контроля части факторов ξ_i ;
- вид функции f и соответственно φ в формуле (10), как правило, определяется по результатам эксперимента, для осуществления которого необходимо достаточное время и средства;
- определение типа и параметров закона распределения границы области работоспособности непосредственно в эксперименте требует проведения специальных испытаний элемента БА КА в условиях нормального функционирования;
- затруднено получение выражений для расчёта показателей безотказности элемента при случайном характере допустимых границ изменения его параметров [4];
- при случайных допустимых границах изменения параметров элемента существенно усложняется задача контроля ТС в процессе эксплуатации из-за необходимости оценивания фактических значений реализаций случайного процесса изменения границы.

Недостатки рассмотренного подхода обусловили широкое распространение в задачах оценивания и прогнозирования ТС *детерминированного подхода* к определению допустимых границ изменения параметров БА КА.

Основой детерминированного подхода является расчёт границ области работоспособности для ситуации, в которой факторы условий эксплуатации воздействуют на качество функционирования БА КА максимально неблагоприятно. Данный подход в литературе иначе называется минимаксным. При этом

$$\hat{\Xi}_{<m>}(T) = \Xi_{<m>}^* \quad (13)$$

где $\Xi_{<m>}^*$ – вектор параметров условий эксплуатации, наиболее неблагоприятно из всех возможных векторов влияющий на качество функционирования элемента.

Подставив $\Xi_{<m>}^*$ в (7), получим условие работоспособности элемента СВТС при максимально неблагоприятных условиях эксплуатации:

$$f(X_{<n>}, \Xi_{<m>}^*) \geq K_{\text{кф}}^{\text{доп}}. \quad (14)$$

Множество значений вектора $X_{<n>}$, удовлетворяющих условию (14), образуют в пространстве R^n некоторую область $Q_{\text{д}}^n \subset Q_{\text{р}}^n \subset Q_{\text{ф}}^n$, называемую допустимой областью изменения параметров элемента.

Для большинства реальных элементов БА КА характерным свойством является криволинейность границ областей $Q_{\text{ф}}^n$, $Q_{\text{р}}^n$ и $Q_{\text{д}}^n$, обусловленная имеющимся в общем случае свойством аддитивности влияния изменения элементов вектора $X_{<n>}$ на значение показателя качества функционирования $K_{\text{кф}}$.

Результаты исследования и их обсуждение

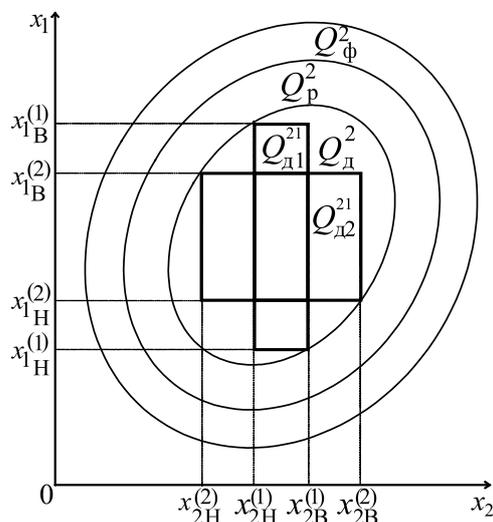
Стремление к упрощению процедур контроля и прогнозирования работоспособности элементов на этапе эксплуатации обусловило введение постоянных допустимых границ изменения параметров (допусковых границ).

Введение постоянных границ поля допуска при криволинейных границах области $Q_{\text{д}}^n$ является задачей неординарной. Основой подхода к ее решению является аппроксимация криволинейной области $Q_{\text{д}}^n$ параллелепипедом (гипербрусом), проекции граней которого на координатные оси и дают значения границ поля допуска. Определение границ поля допуска на параметры элемента для двумерного случая показано на рисунке.

Преимуществами детерминированного подхода по сравнению со стохастическим являются: значительное упрощение процедуры контроля работоспособности БА КА, возможность задания независимых допусков на параметры, простота алгоритмической и аппаратной реализации контроля и прогнозирования ТС. Однако эти преимущества получены ценой сужения области работоспособности при определении области $Q_{\text{д}}^n$ и её дальнейшей аппроксимации гипербрусом. Принимая во внимание то, что определение границ поля допуска на параметры элементов осуществляется на этапе создания КА, когда неопределённость информации об условиях эксплуатации велика, использование детерминированного подхода на практике зачастую приводит к чрезмерному сужению допустимых пределов изменения параметров элементов. Степень сужения области $Q_{\text{р}}^n$ зависит от значения вектора $\Xi_{<m>}^*$. Определение вектора $\Xi_{<m>}^*$ на практике, как правило, осуществляется эвристическими методами, результат применения которых во многом зависит от степени информированности разработчика КА об ожидаемых условиях эксплуатации элементов БА КА. Недостаточно обоснованное сужение границ поля допуска приводит на практике к возрастанию затрат времени и средств на регулирование параметров БА, что снижает готовность КА в целом.

Указанные недостатки определяют необходимость разрешения противоречия между фактическим качеством функционирования

элемента и существующими возможностями изменения программно-алгоритмического обеспечения и настройки аппаратного обеспечения КА, основанными на определении работоспособности в узком смысле.



Определение области работоспособности и границ поля допуска параметров элемента БА КА в двумерном случае

Заключение

Одним из направлений разрешения указанного противоречия является повышение обоснованности определения значения вектора $\Xi_{<m>}^*$ в условиях ограниченного объёма информации об условиях эксплуатации. Данная цель может быть достигнута решением следующих двух задач:

– расширением информационной базы принятия решения о значении вектора $\Xi_{<m>}^*$ на этапе создания КА;

– корректированием значений границ поля допуска параметров элемента БА КА на этапе эксплуатации по мере накопления информации об её условиях.

Для решения этих задач целесообразно использовать информацию, содержащуюся в виде опыта и качественных представлений специалистов, разрабатывающих и эксплуатирующих КА. Принимая во внимание высокую степень неопределённости информации об условиях эксплуатации БА КА, исключаящую возможность применения математического аппарата теории вероятности и математической статистики, а также нечёткость субъективных представлений, суждений специалистов-экспертов, целесообразно применить для априорного определения границ поля допуска параметров

БА КА на стадии создания и эксплуатации математический аппарат теории нечётких множеств.

Список литературы

1. Абраменко Б.С., Маслов А.Я., Немудрук Л.Н. Эксплуатация автоматизированных систем управления. – МО СССР, 1984. – 485 с.
2. Дорохов А.Н. Полиmodelное прогнозирование надёжности бортовой аппаратуры космических аппаратов в условиях неопределённости информации о неблагоприятных воздействиях среды / А.Н. Дорохов, Е.А. Миронов, С.А. Платонов // Информация и космос. – 2014. – № 3. – С. 88–94.
3. Ломакин М.И. Многоmodelная обработка измерительной информации в интеллектуальных системах прогнозирования надёжности космических средств / М.И. Ломакин, А.Н. Миронов, О.Л. Шестопалова // Измерительная техника. – 2014. – № 1. – С. 8–12.
4. Миронов Е.А. Решение задачи идентификации математической модели объекта прогнозирования в условиях неопределённости / Е.А. Миронов, С.А. Платонов // Современные проблемы науки и образования: – 2014. – № 4; URL: www.science-education.ru/118-14029 (дата обращения: 11.03.2015).
5. Шестопалова О.Л. Пути и методы управления развитием системы информационного обеспечения эксплуатации космических средств / Д.А. Севастьянов, О.Л. Шестопалова // Информация и космос. – 2013. – № 1. – С. 6–9.

References

1. Abramenko B.S., Maslov A.Ya., Nemudruk L.N. Eksploatatsiya avtomatizirovannykh sistem upravleniya. MO SSSR, 1984, p. 485.
2. Dorokhov A.N., Mironov E.A., Platonov S.A. Polimodelnoe prognozirovanie nadezhnosti bortovoy apparatury kosmicheskikh apparatov v usloviyakh neopredelennosti informatsii o neblagopriyatnykh vozddeystviyakh sredy. Informatsiya i kosmos, 2014, no. 3, pp. 88–94.
3. Lomakin M.I., Mironov A.N., Shestopalova O.L. Mnogomodelnaya obrabotka izmeritelnoy informatsii v intellektualnykh sistemakh prognozirovaniya nadezhnosti kosmicheskikh sredstv. Izmeritelnaya tekhnika, 2014, no. 1, pp. 8–12.
4. Mironov E.A., Platonov S.A. Reshenie zadachi identifikatsii matematicheskoy modeli obekta prognozirovaniya v usloviyakh neopredelennosti. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2014, no. 4, available at: www.science-education.ru/118-14029.
5. Shestopalova O.L., Sevastyanov D.A. Puti i metody upravleniya razvitiem sistemy informatsionnogo obespecheniya eksploatatsii kosmicheskikh sredstv. Informatsiya i kosmos, 2013, no. 1, pp. 6–9.

Рецензенты:

Козлов В.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры, ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ, г. Санкт-Петербург;

Садин Д.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры, ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ, г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 01.04.2015.