Определение границ поля допуска параметров бортовой аппаратуры космических аппаратов на стадии создания при ограниченном объёме информации об условиях эксплуатации

Delimitation of the tolerance zone of onboard equipment parameters of spacecrafts during the creation stage at the limited scope of information on operating conditions

Миронов / Mironov A.
Андрей Николаевич
(mironov-anik@yandex.ru)
доктор технических наук, профессор.
ФКВГОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А. Ф.Можайского» МО РФ
(ВКА им. А. Ф. Можайского),
профессор кафедры.
г. Санкт-Петербург

Шестопалова / Shestopalova O.
Ольга Львовна
(neman2004@mail.ru)
кандидат технических наук, доцент.
Филиал «Восход» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» в г. Байконуре,
декан факультета «Испытания летательных аппаратов».
г. Байконур

Миронов / Mironov E.
Евгений Андреевич
(john682@mail.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
доцент кафедры.
г. Санкт-Петербург

Платонов / Platonov S.
Сергей Александрович
(platonova123@mail.ru)
ВКА им. А. Ф. Можайского,
заместитель начальника специального факультета – начальник учебной части.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: техническое состояние – technical condition; нечеткие экспертные данные – fuzzy expert data; бортовая аппаратура космических аппаратов – onboard equipment of spacecrafts.

В статье рассмотрены математические основы определения границ поля допуска параметров технического состояния бортовой аппаратуры космического аппарата на стадии создания, основанные на обработке нечетких данных о внешних воздействиях среды. Представлен алгоритм оценивания значений функции принадлежности нечетких границ поля допуска. Применение нечеткого подхода к обработке экспертной информации о факторах космического пространства, воздействующих на космический аппарат, позволяет обосновать назначение границ поля допуска контролируемых параметров бортовой аппаратуры в условиях неполноты информации о характере и количественных значениях внешних факторов.

Mathematical background of delimitation of the tolerance zone of technical condition parameters of onboard equipment of a spacecraft at the creation stage are described in the article, based on processing of fuzzy data on external effects of environment. Estimation algorithm of membership function values of tolerance zone fuzzy borders is provided. Application of fuzzy approach to processing of expert information on the factors of space influencing the spacecraft allows proving assignment of tolerance zone borders of controlled onboard equipment parameters in conditions of incomplete information about the character and quantitative values of external factors.

Эффективность применения космических аппаратов (КА) различного целевого назначения во многом зависит от технического состояния (ТС) бортовой аппаратуры (БА). Контроль состояния бортовых систем КА на этапе орбитального полёта возможен лишь при анализе телеметрической информации, поступающей на наземные командно-измерительные комплексы. Неопределённость информации о внешних условиях, воздействующих на КА в процессе функционирования, создаёт определённые трудности при расчёте и прогнозировании показателей надёжности и живучести БА КА [4]. В настоящее время разработаны методические и алгоритмические основы полимодельного прогнозирования [2] показателей технического состояния БА КА, позволяющие учесть нечёткую информацию о воздействии на КА естественных и преднамеренных факторов с уровнями, превышающими среднестатистические [1]. Кроме этого, в работах [1, 3] проанализированы недостатки существующего подхода и рассмотрена задача обоснования значений границ полей допусков (ГПД) параметров ТС БА КА, в том числе на стадии создания КА. В данной статье представлен алгоритм оценивания значений функции принадлежности нечётких ГПД параметров ТС БА КА на стадии создания, основанный на обработке нечёткой информации о внешних воздействиях среды.

Расчёт значений границ поля допуска параметров БА КА имеет различные особенности в зависимости от размерности вектора выходных параметров.

Нечёткой границей поля допуска параметра x будем называть нечёткое множество $\underset{\sim}{\Delta}$, определяемое посредством преобразования к нормальному нечеткому множеству (НМ) пересечения $\underset{\sim}{H}_p$ и $\underset{\sim}{H}_{н/p}$:

$$\underset{\sim}{\Delta} = \{< x, \mu_{\underset{\sim}{\Delta}}(x) >\}, \tag{1}$$

где $\mu_{\underset{\sim}{\Delta}}(x) = \mu_{\underset{\sim}{H}_p \cap \underset{\sim}{H}_{н/p}}(x) \Big/ \sup_x \mu_{\underset{\sim}{H}_p \cap \underset{\sim}{H}_{н/p}}(x)$; $\mu_{\underset{\sim}{H}_p \cap \underset{\sim}{H}_{н/p}}(x) = \mu_{\underset{\sim}{H}_p}(x) \wedge \mu_{\underset{\sim}{H}_{н/p}}(x)$; $\wedge$ – операция взятия минимального из чисел; $\underset{\sim}{H}_p$ и $\underset{\sim}{H}_{н/p}$ – нечётные множества работоспособного и, соответственно, неработоспособного состояния элемента, заданные на множестве значений параметра x.

Для определения значения функции принадлежности (ФП) $\mu_{\underset{\sim}{H}_{p(н/p)}}(x)$ в точке x_j можно применить метод экспертных оценок, описанный в [5]. Суть метода состоит в том, что выбирается несколько возможных значений ФП из множества чисел [0, 1], включая концы интервала. Обычно число значений не превышает 10–12. Каждому из этих значений экспертами присваивается определённая оценка. Затем эти оценки обрабатываются, в результате чего определяется оценка μ^*_p значения $\mu_{\underset{\sim}{H}_{p(н/p)}}(x)$ ФП НМ $\underset{\sim}{H}_{p(н/p)}$ в точке x_j.

Рассмотрим сущность методики определения оценки μ^*_p более подробно. Формируется дискретное множество значений ФП, например {0;0,1;0,2;...;1}. Задача экспертов заключается в присвоении каждому элементу этого множества определённой оценки, например от 0 до 1. Результаты опроса экспертов сводятся в таблицу, строки которой соответствуют номерам экспертов, а столбцы – возможным значениям функции принадлежности (табл. 1).

В табл. 1 приняты следующие обозначения: L – число экспертов; M – мощность множества числа значений ФП, $M = \text{card}\ \{P\} = \frac{1}{\delta}+1$, где $\delta = 0{,}1$ – шаг дискретизации множества значений ФП [0,1]; $\xi_{l\,p}$ – оценка, данная для p-го значения ФП l-м экспертом.

С целью повышения достоверности результатов необходимо учесть компетентность экспертов и проверить согласованность их ответов. Поэтому найденные ранее нормированные коэффициенты компетентности экспертов умножают на результаты опроса экспертов (табл. 1):

$$\xi^{н}_{l\,p} = K^{н}_{к\,l}\,\xi_{l\,p}. \tag{2}$$

Согласованность ответов определяется с помощью коэффициента конкордации, т.е. общего коэффициента оценочной (ранговой) корреляции для группы, состоящей из L экспертов. Прежде всего, определяется коэффициент конкордации:

$$W = S \Big/ \left\{ \left[\frac{1}{12} L^2 \left(M^3 - L \right) - L \sum_{l=1}^{L} T_l \right] \Big/ \left[\sum_{l=1}^{L} K^{н}_{к\,l} \Big/ L \right] \right\}, \tag{3}$$

где

$$S = \sum_{p=1}^{M} \left[\sum_{l=1}^{L} \xi_{l\,p} - \frac{1}{2} L(M+1) \right]^2;\ T_l = \frac{1}{12} \sum_{t_l} d_l \left(d_l^2 - 1 \right);\ d_l$$

– число совпадающих оценок у l-го эксперта.

Суммы T_l подсчитываются для каждого эксперта, у которого оказались совпавшие оценки. Пусть, например, от l-го эксперта получены следующие оценки: {0,05; 0,2; 0,25; 0,6; 0,8; 0,7; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0,06}. Тогда для него величина T_l подсчитывается следующим образом:

$$T_l = \frac{1}{12}(2^3 - 2) = 0{,}5.$$

Таблица 1

Эксперты \ Возможные значения ФП НМ $\underset{\sim}{H}_{p(н/p)}$ при $x = x_j$	1	2	…	p	…	M
	0	0,1	…	$\delta_{(p-1)}$	…	1
1	ξ_{11}	ξ_{12}	…	$\xi_{1\,p}$	…	$\xi_{1\,M}$
2	ξ_{21}	ξ_{22}	…	$\xi_{2\,p}$	…	$\xi_{2\,M}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
l	$\xi_{l\,1}$	$\xi_{l\,2}$	…	$\xi_{l\,p}$	…	$\xi_{l\,M}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
L	$\xi_{L\,1}$	$\xi_{L\,2}$	…	$\xi_{L\,p}$	…	$\xi_{L\,M}$

После этого находим величину

$$B = (M-1)LW. \quad (4)$$

Данная величина имеет χ^2 распределение с $(M-1)$ степенями свободы. Проверкой выполнимости неравенства

$$B > \chi^2(\nu, q), \quad (5)$$

где в правой части стоит табличное значение χ^2, определяемое числом степеней свободы $\nu = M-1$ и доверительной вероятностью q, можно оценить согласованность мнений экспертов. (Как правило, доверительная вероятность q в таких случаях принимается равной 0,95–0,99).

Если неравенство (5) выполняется, это значит, что существует неслучайная согласованность во мнениях экспертов. В этом случае усреднённая нормированная оценка на каждое значение ФП может быть определена по формуле

$$\mu_p = \sum_{l=1}^{L} \mu_{lp} \Big/ \sum_{l=1}^{L}\sum_{p=1}^{M} \mu_{lp}, \quad (6)$$

где

$$\mu_{lp} = \xi^{н}_{lp} \Big/ \sum_{p=1}^{M} \xi^{н}_{lp}.$$

В случае невыполнения неравенства (5) производится обмен мнениями между экспертами, после чего опрос повторяется. Эта процедура реализуется до тех пор, пока не будет достигнута согласованность в ответах экспертов. Оценка значения $\underset{\sim}{H}_{p(н/p)}(x)$ в точке x_j определяется по наибольшему найденному значению μ_p:

$$\underset{\sim}{H}_{p(н/p)}(x_j) = \mu_j = \max_{p=\overline{1,M}}\{\mu_p\}. \quad (7)$$

Исходными данными второго этапа оценивания ФП НМ $\underset{\sim}{H}_{p(н/p)}$ являются результаты определения с помощью описанного выше алгоритма значений $\underset{\sim}{H}_{p(н/p)}(x)$ в дискретной последовательности точек $\{x_j\}$, $j = \overline{1,J}$, представленные в табличной форме (табл. 2).

Из класса Ф параметрических функций необходимо выбрать некоторый их подкласс $\varphi(x;\vec{p})$ и так задать значения параметров $\vec{p} = \langle p^1, \ldots, p^m \rangle$, чтобы функция $\varphi(x;\vec{p})$ описывала результаты оценивания ФП, представленные в табл. 2, наиболее оптимально в смысле выбранного критерия. Выбор подкласса $\varphi(x;\vec{p})$ осуществляется, как правило, либо из физических соображений о сущности исследуемой зависимости, либо непосредственно по виду данных экспертного опроса (табл. 2).

Критерием оптимальности при решении подобных задач принято считать критерий минимума суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от сглаживающей кривой $\varphi(x;\vec{p})$. Параметры $\vec{p}$ при этом определяются из условия:

$$\vec{p}^{\,*} = \arg\min_{\vec{p}\in R^m} f(\vec{p}), \quad (8)$$

где

$$f(\vec{p}) = \sum_{j=1}^{J}\left[\mu_j - \varphi(x_j;\vec{p})\right]^2.$$

Задача нахождения вектора $\vec{p}^{\,*}$ есть задача безусловной оптимизации функции $f(\vec{p})$. Общим методом определения $\vec{p}^{\,*}$ является решение системы уравнений:

$$\left\langle \frac{\partial f}{\partial p^1}, \frac{\partial f}{\partial p^2}, \ldots, \frac{\partial f}{\partial p^m} \right\rangle^{\mathrm{T}} = 0. \quad (9)$$

Система (9) относительно легко разрешима, если функция $\varphi(x;\vec{p})$ линейна относительно $\vec{p}$.

Если $\varphi(x;\vec{p})$ нелинейна относительно параметров $\vec{p}$, решение системы (9) может оказаться сложным и трудоёмким. В этом случае целесообразно применять численные методы поиска экстремума $f(\vec{p})$.

Достаточно простым в реализации и эффективным (для функций, не имеющих «овражных» образований) является метод покоординатного спуска (Гаусса–Зейделя) [6].

К функциям принадлежности, используемым для описания ГПД, предъявляются следующие требования:

– быть унимодальными либо монотонными;
– зависеть от небольшого количества параметров;
– хорошо поддаваться обработке на ЭВМ.

Этим требованиям удовлетворяет ФП вида

Таблица 2

Значение параметра x	x_1	x_2	…	x_j	…	x_J
Значение ФП $\underset{\sim}{H}_{p(н/p)}(x_j)$	μ_1	μ_2	…	μ_j	…	μ_J

$$\mu(x) = [1 + a(x - c)^b]^{-1}. \qquad (10)$$

Характер функции (10) зависит от трёх параметров: c – определяет точку минимума «нечёткости», a – размах кривой, b – поведение фронтов кривой.

В дальнейшем будем использовать три разновидности ФП (10), соответствующие следующим нечётким высказываниям:

1) «x меньше c_1»

$$\mu^{(1)}_{\underset{\sim}{H}_j}(x) = \begin{cases} \left[1 + a_1(x - c_1)^{-2}\right]^{-1}, & x < c_1, \\ 0, & x \ge c_1; \end{cases} \qquad (11)$$

2) «x больше c_2»

$$\mu^{(2)}_{\underset{\sim}{H}_j}(x) = \begin{cases} \left[1 + a_2(x - c_2)^{-2}\right]^{-1}, & x > c_2, \\ 0, & x \le c_2; \end{cases} \qquad (12)$$

3) «x приблизительно равно c_3»

$$\mu^{(3)}_{\underset{\sim}{H}_j}(x) = \left[1 + a_3(x - c_3)^{-2}\right]^{-1}. \qquad (13)$$

На рис. 1 приведена графическая интерпретация ФП (11), используемой для аппроксимации результатов опроса экспертов.

С учётом (11) и (12) нечёткое множество $\underset{\sim}{\Delta}$, определяемое в соответствии с (1), описывается ФП, имеющей вид:

$$\mu^{\text{н}}_{\underset{\sim}{\Delta}_{\text{н(в)}}}(x) = \mu_{\underset{\sim}{\Delta}_{\text{н(в)}}}(x) \Big/ \max_x \mu_{\underset{\sim}{\Delta}_{\text{н(в)}}}(x), \qquad (14)$$

где

$$\mu_{\underset{\sim}{\Delta}_{\text{н(в)}}}(x) = \begin{cases} \mu^{(1)}_{\underset{\sim}{H}_{\text{н/р(р)}}}(x),\ x \le x_M, \\ \mu^{(2)}_{\underset{\sim}{H}_{\text{н/р(р)}}}(x),\ x > x_M, \end{cases} \quad x_M = \arg\max_x \mu_{\underset{\sim}{H}_{\text{н/р}} \cap \underset{\sim}{H}_{\text{р}}}(x).$$

На рис. 2 показано оценивание ФП $\mu_{\Delta_{\text{н}}}(x)$ нижней границы поля допуска k-го параметра элемента.

Параметры (a_i, c_i) ФП (11), (12) и (13) определяются методом покоординатного спуска.

Оценивание границ поля допуска в случае векторного выходного параметра элемента БА КА имеет определённые особенности, связанные с возможностью наличия зависимости допусков параметров друг от друга, и осуществляется в два этапа.

1. Определяется наличие или отсутствие зависимости допусков посредством опроса экспертов и обработки их ответов методом, применявшимся ранее для установления целесообразности учёта изменений условий эксплуатации при расчёте ГПД параметров.

2. В случае наличия такой зависимости производится ранжирование исходного множества параметров БА КА по критерию убывания временных затрат на регулирование параметра. Для решения данной задачи можно воспользоваться, например, методом непосредственного ранжирования.

Далее определяется ГПД параметра, время регулирования которого максимально. Затем последовательно, по мере убывания времени регулирования, производится определение значений ГПД остальных параметров с учётом ранее определённых значений ГПД. При этом

$$x^{(k)}_{\text{н(в)}} = \sum_{l=1}^{L} K^{\text{н}}_{\text{к}\,l}\, \tilde{x}^{(k)}_{\text{н(в)}l} \Big| x_k \in X_{\{n-p\}} \qquad (15)$$

и

$$\underset{\sim}{\Delta}^{(k)}_{\text{н(в)}} = \{< x_k, \mu^{\text{н}}_{\underset{\sim}{\Delta}^{(k)}_{\text{н(в)}}}(x_k) >\} \mid x_k \in X_{\{p\}}, \qquad (16)$$

где $X_{\{p\}}$ – подмножество множества $X_{\{n\}}$ выходных параметров, для элементов которого характерно наличие зависимости ГПД от изменения условий эксплуатации;

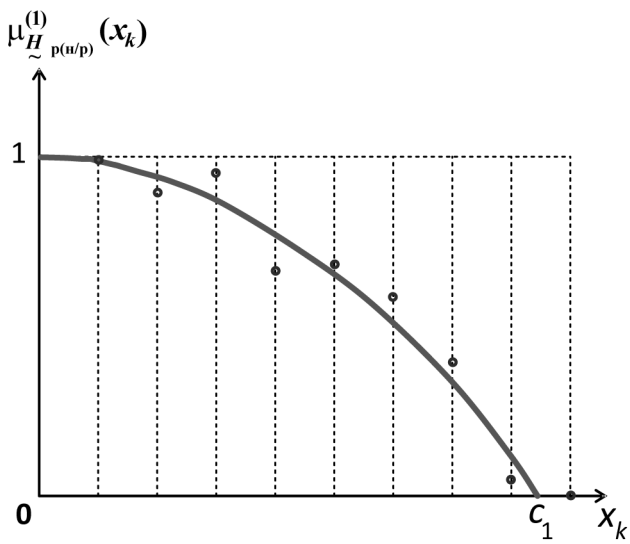

Рис. 1. Аппроксимация результатов экспертного опроса аналитической функцией первого типа

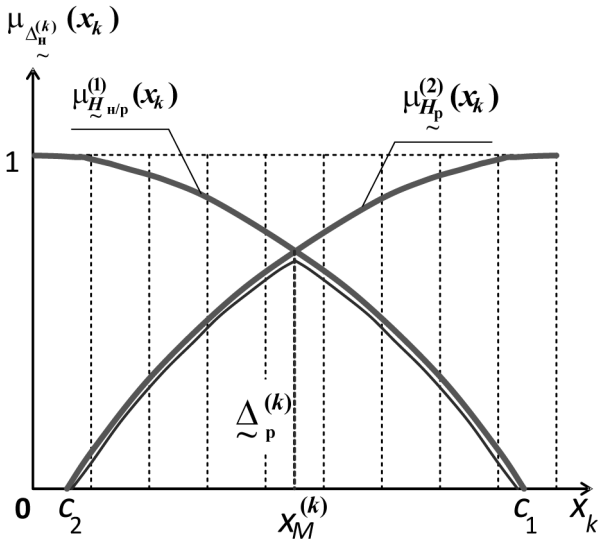

Рис. 2. Определение функции принадлежности нечёткого множества $\underset{\sim}{\Delta}_{н}^{(k)}$ нижней границы поля допуска k-го параметра БА КА

$X_{\{n-p\}}$ – подмножество множества $X_{\{n\}}$ выходных параметров, для элементов которого характерно отсутствие зависимости ГПД от изменения условий эксплуатации; $x_{н(в)}^{(k)}$ – чёткая ГПД k-го параметра (нижняя либо верхняя); $\underset{\sim}{\Delta}_{н(в)}^{(k)}$ – нечёткая ГПД k-го параметра (нижняя либо верхняя).

В случае отсутствия зависимости допусков параметров элемента БА КА последовательность расчёта ГПД значения не имеет и может быть произвольной.

Таким образом, представленный математический аппарат позволяет реализовать оценивание функций принадлежности нечётких множеств границ поля допуска параметров БА КА непосредственно экспертным методом. Это позволяет преодолеть принципиальные трудности, связанные с отсутствием информации о точном числе факторов условий эксплуатации, а также с затруднённой количественной оценкой некоторых факторов.

Литература

1. Дорохов, А. Н. Полимодельное прогнозирование надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов в условиях неопределенности информации о неблагоприятных воздействиях среды / А.Н. Дорохов, Е.А. Миронов, С.А. Платонов // Информация и Космос. – 2014. – № 3. – С. 88–94.

2. Миронов, Е. А. Решение задачи идентификации математической модели объекта прогнозирования в условиях неопределенности [Электронный ресурс] / Е.А. Миронов, С.А. Платонов // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. – 2014. – № 4. – Режим доступа: http://www.science-education.ru/118-14029, свободный. – Загл. с экрана.

3. Додин, И. С. Прогнозирование нечетких границ поля допуска параметров элементов сложных технических систем на этапе их создания или модернизации / И.С. Додин, А.Н. Миронов, М.М. Пеньков // Приборостроение. – 2003. – № 1 – С. 7–11.

4. Ломакин, М. И. Многомодельная обработка измерительной информации в интеллектуальных системах прогнозирования надежности космических средств / М.И. Ломакин, А.Н. Миронов, О.Л. Шестопалова // Измерительная техника. – 2014. – № 1. – С. 8–13.

5. Бешелев, С. Д. Экспертные оценки / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. – М.: Наука, 1973. – 297 с.

6. Четыркин, Е. М. Статистические методы прогнозирования / Е.М. Четыркин. – М.: Статистика, 1977. – 200 с.