

УДК 62-91:004.023

ОЦЕНИВАНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ГРАНИЦ ПОЛЯ ДОПУСКА ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

¹Миронов Е.А., ¹Миронов А.Н., 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 рассмотрены вопросы прогнозирования технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов при нечётко заданных границах поля допуска параметров, определяющих техническое состояние бортовой аппаратуры. Предложен способ преобразования нечётких границ поля допуска к чётким с использованием дополнительной информации о цене отказа элемента бортовой аппаратуры космических аппаратов по рассматриваемому параметру. Приведены достоинства и недостатки описанного способа, сформулирована задача оценивания чёткого значения границы поля допуска параметра элемента при ограниченном объёме информации об условиях эксплуатации. Описан подход к решению данной задачи, представлен способ решения задачи нечёткого математического программирования в относительно простой форме, приведены рекомендации для практической реализации предложенного способа применительно к элементам бортовой аппаратуры космических аппаратов на стадии эксплуатации.

Ключевые слова: техническое состояние, прогнозирование отказа, нечёткое математическое программирование

EVALUATION VALUES SPECIFICATION LIMITS SPACECRAFT ONBOARD EQUIPMENT PARAMETERS ON THE OPERATING STAGE WITH FUZZY INFORMATION

¹Mironov E.A., ¹Mironov A.N., 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 describes how to predict the technical condition of the onboard equipment spacecraft with fuzzy defined boundaries of the tolerance parameters determining the technical condition of the onboard equipment. We propose a way to convert the fuzzy specification limits for crisp, with the additional information about the price of failure element onboard equipment spacecraft on the considered parameter. Shows the advantages and disadvantages of the described method, formulated the problem of estimating the value of clear specification limit setting element with a limited amount of information about the operating conditions. An approach to solving this problem, a method of solving the problem of fuzzy mathematical programming in a relatively simple manner, provides guidance for the practical implementation of the proposed method with respect to the elements of on-board equipment of spacecraft at the operating stage.

Keywords: technical condition, failure prediction, fuzzy mathematical programming

Существующие на данный момент программно-алгоритмические комплексы прогнозирования технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов обладают рядом недостатков, описанных в [2, 4, 6]. В работах [1, 2] проанализированы особенности существующего подхода и рассмотрена задача обоснования нечётких значений границ поля допуска (ГПД) параметров ТС БА КА в условиях неопределённой информации о внешних воздействиях среды, в том числе на стадии создания КА. В данной статье предложен способ преобразования нечётких границ поля допуска к чётким с использованием дополнительной информации о цене отказа элемента БА КА по рассматриваемому параметру.

Цель исследования

Математический аппарат теории нечётких множеств [3] позволяет реализовать оценивание функций принадлеж-

ности границ поля допуска параметров БА КА непосредственно экспертным методом. Это даёт возможность преодолеть принципиальные трудности, связанные с отсутствием информации о точном числе факторов условий эксплуатации, а также с затруднённой количественной оценкой некоторых факторов [5]. Однако представление решения задачи прогнозирования момента отказа элемента БА КА в форме нечёткого множества имеет смысл, когда такая форма содержательно понятна лицу, принимающему решение по результатам прогнозирования по управлению ТС БА КА. В подавляющем большинстве практических задач, характерных для стадии эксплуатации КА, необходимо знание момента отказа элемента в чёткой (фиксированной) форме. Это обуславливает необходимость осуществления перехода к чётким значениям ГПД параметров на этапе создания КА.

Материалы и методы исследования

Исследуем особенности процесса прогнозирования технического состояния (ТС) бортовой аппаратуры космических аппаратов (БА КА) при следующих исходных допущениях:

– ТС элемента характеризуется одним выходным параметром x ;

– информация об изменении ТС представлена единственной реализацией $x(t)$ случайного процесса $\hat{x}(t)$ изменения выходного параметра;

– поле допуска параметра x – одностороннее, с верхней (для определённости) границей, заданной в нечёткой форме (нечётким множеством $\Delta = \{x, \mu_{\Delta}(x)\}$);

– реализация случайного процесса $\hat{x}(t)$ монотонная.

Обозначим $\hat{x}_T(l)$, $l=1, L$ результат прогноза реализации $x(t)$, известной до момента T , с упреждением l . Если $\hat{x}_T(l)$ рассматривать как функцию упреждения прогноза l , то $\hat{x}_T(l)$ является прогнозирующей функцией.

Для определения момента отказа элемента БА КА решим относительно l уравнение

$$\hat{x}_T(l) = \{x, \mu_{\Delta}(x)\}. \quad (1)$$

Обозначив $\hat{x}_T(l) = f(l)$, получим

$$l = \{x, \mu_{\Delta}(x)\},$$

где $\phi(x) = f^{-1}(l)$ – функция обратная $f(l)$.

Следовательно, момент отказа элемента $\tau_{\text{отк}}$ определяется как

$$\tau_{\text{отк}} = T + l = T + \{x, \mu_{\Delta}(x)\}.$$

Согласно правилу сложения нечётких чисел [66], имеем:

$$\tau_{\text{отк}} = \{t, \mu_{\tau_{\text{отк}}}(t)\}, \quad (2)$$

где $t = T + \phi(x)$, $\mu_{\tau_{\text{отк}}}(t) = \mu_{\Delta}(x)$.

Таким образом, при нечётко определённой границе поля допуска (ГПД) параметра x , момент отказа элемента $\tau_{\text{отк}}$ есть нечёткое множество на оси времени с функцией принадлежности $\mu_{\Delta}(x) = \mu_{\Delta}[\hat{x}_T(l)]$. На рис. 1 показано определение момента отказа в случае монотонного изменения реализации случайного процесса $\hat{x}(t)$. Функция принадлежности НМ $\tau_{\text{отк}}$, как видно из рис. 1, является унимодальной.

Если снять ограничение, касающееся монотонности изменения реализации случайного процесса $\hat{x}(t)$, то функция принадлежности НМ $\tau_{\text{отк}}$ будет, как показано на рис. 2, полимодальной (имеющей несколько локальных экстремумов). При этом

$$\tau_{\text{отк}} = \{t, \mu_{\tau_{\text{отк}}}(t)\},$$

$$S_{\tau_{\text{отк}}} = \{t | \hat{x}_T(l) \in S_{\Delta}\},$$

$$\mu_{\tau_{\text{отк}}}(t) = \mu_{\Delta}[\hat{x}_T(l)],$$

где $S_{\tau_{\text{отк}}}$ и S_{Δ} – носители НМ $\tau_{\text{отк}}$ и Δ соответственно.

Результаты исследования и их обсуждение

Представление решения задачи прогнозирования момента отказа элемента в форме нечёткого множества имеет смысл, когда такая форма содержательно понятна лицу, принимающему решение по результатам

прогнозирования по управлению ТС БА КА. Однако в подавляющем большинстве практических задач, характерных для этапа эксплуатации КА, необходимо знание момента отказа элемента в чёткой (фиксированной) форме. Это обуславливает необходимость осуществления дополнительных операций по «стягиванию» нечёткого множества $\tau_{\text{отк}}$ в точку на временной оси. Для этих целей может быть использована дополнительная информация по отношению к имевшейся ранее при определении нечёткого множества Δ ГПД. Одним из таких способов является следующий:

– определяется чёткое множество α -уровня НМ $\tau_{\text{отк}}$

$$\tau_{\text{отк}}^{\alpha} = \{t | \mu_{\tau_{\text{отк}}}(t) \geq \alpha\}, \quad (3)$$

– находится чёткое значение момента отказа $\tau_{\text{отк}}$ как

$$\tau_{\text{отк}} = \inf_t \tau_{\text{отк}}^{\alpha}. \quad (4)$$

В качестве дополнительной информации при определении значения уровня α целесообразно использовать информацию о цене отказа элемента БА КА β_x по рассматриваемому параметру x . При этом очевидно, что α и β_x должны быть связаны некоторой функциональной зависимостью $\alpha = g(\beta_x)$. Функция g является монотонно убывающей.

Положительной стороной изложенного подхода к определению фиксированного момента отказа БА КА является возможность учёта дополнительной информации, имеющейся непосредственно в момент прогнозирования. Так как КА представляют собой сложные многофункциональные объекты, цена отказа элементов которых определяется важностью решаемой задачи и соответственно изменяется во времени, то критерий определения значения $\tau_{\text{отк}}$ на основе (3) и (4) является наиболее гибким с точки зрения учёта специфики функционирования БА КА в реальном масштабе времени.

Однако практическая реализация данного критерия фиксации момента отказа осложняется необходимостью определения значения β_x цены отказа элемента по параметру x методом экспертного оценивания, что не всегда является возможным ввиду отсутствия достаточного количества компетентных экспертов в момент прогнозирования ТС, кроме того существуют определённые трудности в выборе конкретного типа функции $g(\beta_x)$. Необходимость выполнения описанных операций наряду с непосредственным прогнозированием реализации $x(t)$ увеличивает общее время прогнозирования момента отказа элемента БА КА, что отрицательно сказывается на готовности КА в целом.

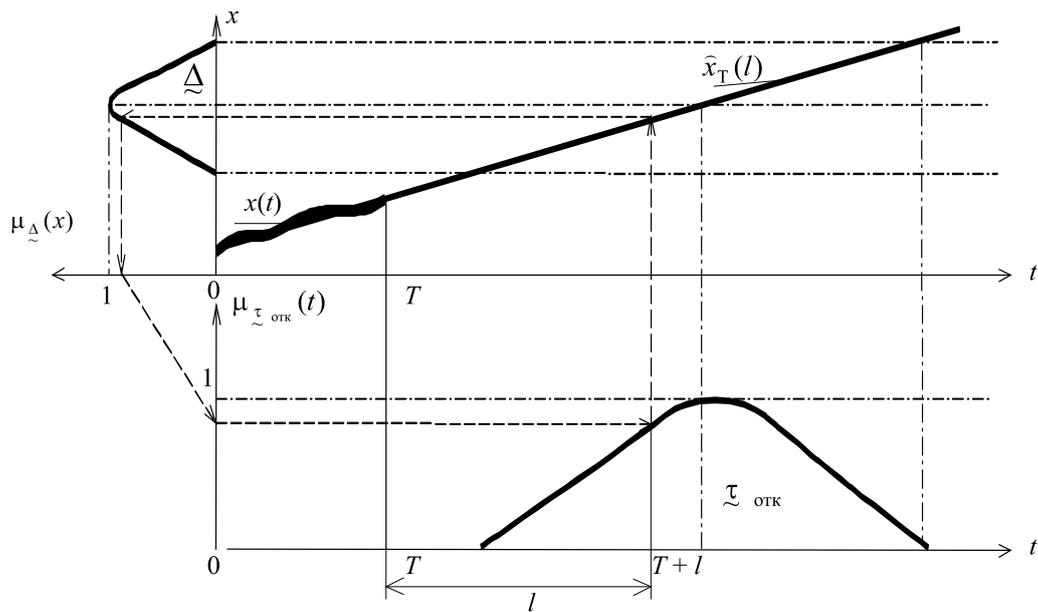


Рис. 1. Определение момента отказа в случае монотонного изменения реализации $x(t)$ случайного процесса $\hat{x}(t)$ и нечётко определённой верхней ГПД Δ

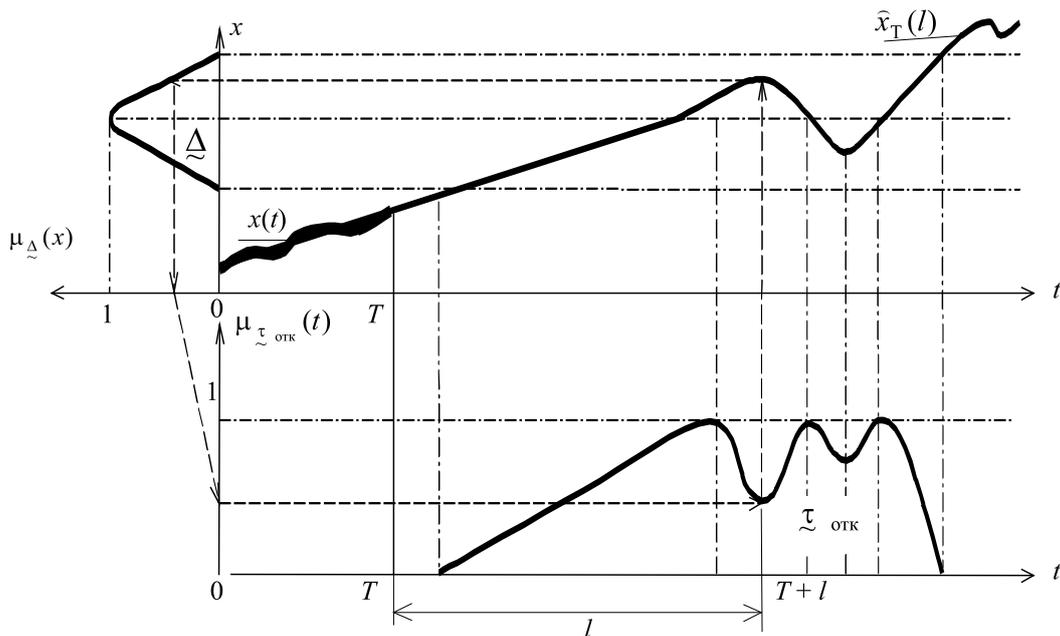


Рис. 2. Определение момента отказа в случае немонотонного изменения реализации $x(t)$ случайного процесса $\hat{x}(t)$ и нечётко определённой верхней ГПД Δ

Использование данного подхода на практике предполагает задание ГПД параметра x в нечёткой форме для всего периода эксплуатации. Это значительно усложняет процедуру контроля ТС, делает невозможным применение для этой цели существующих технических средств контроля и про-

гнозирования ТС, ориентированных на использование чётких ГПД.

Указанные недостатки обуславливают необходимость расчёта чётких значений ГПД параметров на этапе создания КА. Ввиду того, что информация об условиях эксплуатации БА КА на этапе создания

ограничена, для повышения точности определения ГПД целесообразно по мере накопления подобной информации производить периодическую коррекцию их значений.

Задача оценивания чёткого значения границы поля допуска параметра элемента при ограниченном объёме информации об условиях эксплуатации может быть сформулирована следующим образом.

Пусть X – универсальное множество альтернатив, т.е. универсальная совокупность всех возможных выборов лица, принимающего решения (ЛПР). Множество X есть множество возможных значений параметра x . Задано нечёткое ограничение или множество допустимых альтернатив, описываемое нечётким подмножеством множества X . Множество допустимых альтернатив есть нечёткое множество $\underline{\Delta}$ границы поля допуска параметра x . Задача принятия решений заключается при этом в выборе допустимой альтернативы (чёткого значения ГПД), которая лучше или не хуже всех остальных альтернатив в смысле заданного отношения предпочтения, отражающего интересы лица, принимающего решения.

Рассмотрим отношение предпочтения в форме так называемой функции полезности, имеющей вид отображения множества альтернатив на числовую ось. Задачи принятия решения, в которых отношение предпочтения описано чётко в форме функции полезности, а нечёткость содержится в описании множества альтернатив, относятся к задачам нечёткого математического программирования (НМП).

Решение задачи НМП в относительно простой форме возможно на основании подхода Беллмана-Заде. Основным в данном подходе к решению рассматриваемой задачи является то, что цели принятия решений и множество альтернатив рассматриваются

как равноправные нечёткие подмножества универсального множества альтернатив. Нечёткой целью в X является нечёткое подмножество X , которое будем обозначать \underline{G} . Описывается нечёткая цель функцией принадлежности $\mu_{\underline{G}}: X \rightarrow [0, 1]$.

Нечётким решением задачи достижения нечёткой цели называется пересечение нечётких множеств цели и ограничений, т.е. функция принадлежности решения \underline{D} имеет вид (рис. 3)

$$\mu_{\underline{D}}(x) = \min\{\mu_{\underline{\Delta}}(x), \mu_{\underline{G}}(x)\}. \quad (5)$$

При наличии нескольких целей нечёткое решение описывается функцией принадлежности

$$\mu_{\underline{D}}(x) = \min\{\mu_{\underline{\Delta}}(x), \mu_{\underline{G}_1}(x), \dots, \mu_{\underline{G}_m}(x)\}. \quad (6)$$

Если различные цели различаются по важности и заданы соответствующие коэффициенты относительной важности целей λ_i , то ФП решения задачи определяется выражением

$$\mu_{\underline{D}}(x) = \min\{\mu_{\underline{\Delta}}(x), \lambda_1 \mu_{\underline{G}_1}(x), \dots, \lambda_m \mu_{\underline{G}_m}(x)\}. \quad (7)$$

Заключение

Определённое таким образом решение можно рассматривать как нечётко сформулированную инструкцию, исполнение которой обеспечивает достижение нечётко поставленной цели. Нечёткость полученного решения \underline{D} есть следствие нечёткости самой исходной задачи. При таком представлении решения остаётся неопределённость, связанная со способом исполнения подобной нечёткой инструкции, т.е. с тем, какую альтернативу выбрать. Различные способы разрешения этой неопределённости предлагаются, например, в работе Л. Заде [3].

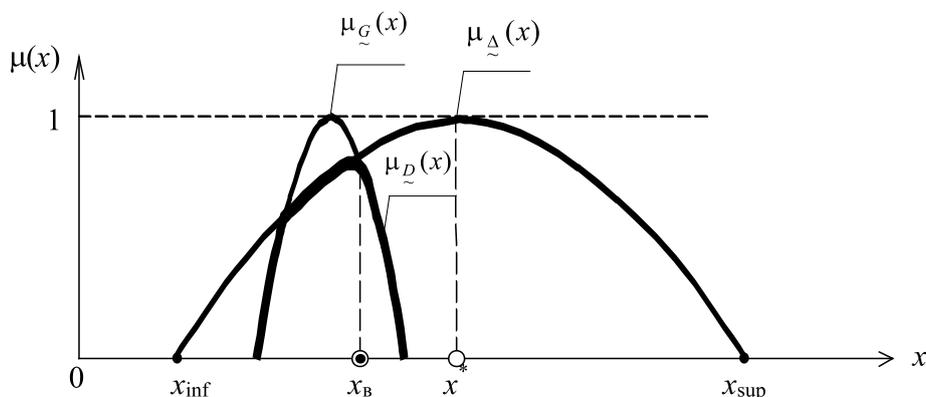


Рис. 3. Нечёткое решение задачи НМП на основании подхода Беллмана-Заде

Один из наиболее распространённых в литературе способов состоит в выборе альтернативы, имеющей максимальную степень принадлежности нечёткому решению, т.е. альтернативы, реализующей

$$\max_{x \in X} \mu_{\mathcal{D}}(x) = \max_{x \in X} \min \{ \mu_{\mathcal{A}}(x), \mu_{\mathcal{G}}(x) \}. \quad (8)$$

Такую альтернативу называют максимирующим решением.

Задача выбора фиксированного значения границы поля допуска параметра x есть, таким образом, задача поиска максимирующего решения (8) в задаче НМП.

Список литературы

1. 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.
2. Дорохов А.Н. Полимодельное 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. Заде Л. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений // Математика сегодня: Пер. с англ. – М.: Знание, 1974. – С. 5–49.
4. Ломакин М.И. Многомодельная 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.
5. 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).
6. 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. Dodin I.S., Mironov A.N., Penkov M.M. Prognozirovaniye nechetkikh granits polya dopuska parametrov elementov slozhnykh tekhnicheskikh sistem na etape ikh sozdaniya ili modernizatsii. Priborostroenie, 2003, no. 1, pp. 7–11.
2. Dorokhov A.N., Mironov E.A., Platonov S.A. Polimodelnoe prognozirovaniye nadezhnosti bortovoy apparatury kosmicheskikh apparatov v usloviyakh neopredelennosti informatsii o neblagopriyatnykh vozdeystviyakh sredy. Informatsiya i kosmos, 2014, no. 3, pp. 88–94.
3. Zadeh L. Osnovy novogo podkhoda k analizu slozhnykh sistem i protsessov prinyatiya resheniy. Matematika segodnya, 1974, pp. 5–49.
4. 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.
5. 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.
6. Shestopalova O.L., Sevastyanov D.A. Puti i metody upravleniya razvitiem sistemy informatsionnogo obespecheniya ekspluatatsii kosmicheskikh sredstv. Informatsiya i kosmos, 2013, no. 1, pp. 6–9.

Рецензенты:

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

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

Работа поступила в редакцию 01.04.2015.