УДК 681.518.52

А. М. БАРАНОВСКИЙ, В. А. БЕЛОЗЕРОВ, Д. И. ОПРЫШКО

КОМБИНИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОЦЕНИВАНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Предложен новый подход к выбору показателей достоверности контроля технического состояния сложных систем на основе нечетко-вероятностной модели контроля аппаратных средств, приведены соотношения для их определения.

Ключевые слова: *достоверность контроля, комбинированная модель аппаратных средств автоматических систем, нечеткие множества и системы.*

Введение. В процессе обновления и частичной модернизации образцов ракетно-космической техники (РКТ) происходит совместная эксплуатация различных элементов системы. При этом для одних элементов имеется информация различного качества в достаточном объеме, информация о других элементах может отсутствовать. Это требует дальнейшего интенсивного развития новых подходов к оценке достоверности контроля (ДК) технического состояния, так как в отсутствие экспериментальных данных о составных частях космических аппаратов (КА) общепринятые методы определения достоверности контроля недостаточно адекватно отражают процессы контроля.

Информация о надежности элементов КА и наземного испытательного оборудования (НИО) имеет различные источники. Часть информации приобретается в результате испытаний и носит вероятностный характер, другая — приобретается в результате оценок экспертов. Информация может быть получена и в результате небольшого числа наблюдений, по которым невозможно построить точные вероятностные оценки — получаемые оценки оказываются заниженными или завышенными по сравнению с реальными. Данный факт оказывает существенное влияние на обоснованность принимаемых решений по результатам контроля. Поэтому предлагается учитывать разнородность поступающей информации для получения оценок достоверности контроля аппаратных средств и использовать математические методы комбинирования нечетко-вероятностной информации.

Постановка задачи. Рассмотрим функциональную модель объекта, на которой структурно определены входы, выходы и соответствующая ей теоретико-множественная модель с учетом нечетко-вероятностного описания элементов

$$\Delta = < T, X, Y, Z, \Psi, \tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z}, \tilde{\Psi} >,$$

где $T=\{t\}$ — множество моментов времени t, в которые наблюдается состояние объекта контроля (ОК); $\mathbf{X}$ — универсальное множество входных воздействий ОК; $\mathbf{Y}$ — универсальное множество выходных реакций ОК; $\tilde{X} = \{x, \mu_{\tilde{X}}(x)\}$ и $X = \{p(x)\}$ — нечеткое и вероятностное множество входных воздействий ОК соответственно; $\mu_{\tilde{X}}(x)$ — функция принадлежности входных воздействий x множеству $\tilde{X}$; $\tilde{Y} = \{y, \mu_{\tilde{Y}}(y)\}$ и $Y = \{p(y)\}$ — нечеткое и вероятностное множество выходных реакций ОК соответственно; $\mu_{\tilde{Y}}(y)$ — функция принадлежности выходных реакций y множеству $\tilde{Y}$; $\mathbf{Z}=\{Z_{<m>} | z \in Z_{<m>}\}$ — универсальное множество состояний ОК; $\tilde{Z} = \{z, \mu_{\tilde{Z}}(z)\}$ и $Z = \{p(z)\}$ — соответственно нечеткое и вероятностное множество состояний ОК; $\mu_{\tilde{Z}}(z)$ — функция принадлежности внутренних переменных z множеству $\tilde{Z}$; Ψ и $\tilde{\Psi}$ — вероятностный и нечеткий оператор выходов соответственно, которые реализуют отображения

$$\Psi : T \times X \times Z \to Y,$$

$$\tilde{\Psi} : T \times \tilde{X} \times \tilde{Z} \to \tilde{Y} \times M, M \in [0, \ 1].$$

Состояние системы полностью наблюдаемо, если выполняется следующее условие:

$$\mathbf{Y}(t_1) \neq \mathbf{Y}(t_2) \Rightarrow \mathbf{Z}(t_1) \neq \mathbf{Z}(t_2),$$

$$t_1, t_1 \in T; \ \mathbf{X}(t) \in \mathbf{X},$$

в этом случае всегда возможно определить ее состояния $\mathbf{Z}(t) \in \mathbf{Z}$ по данным измерений сигналов $\mathbf{X}(t) \in \mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}(t) \in \mathbf{Y}$ на входах и выходах системы. Однако конечной целью контроля является определение вида технического состояния объекта в данный момент времени. При контроле исправности объекта различают два технических состояния — исправное (z_+) и неисправное (z_-), и два результата контроля — объект контроля годен $(e_г)$ и не годен $(e_н)$, при таком подходе решение задачи классификации заключается в отыскании отображений:

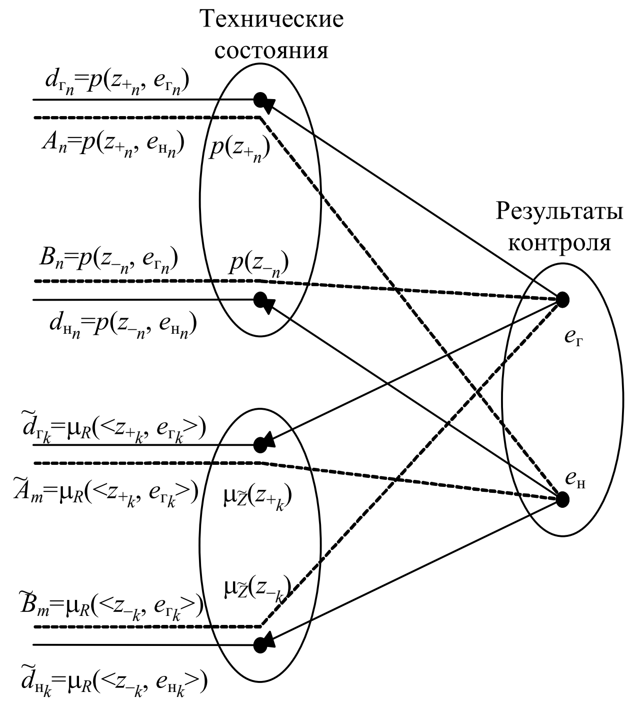
$$\psi : Y \to E, \ \tilde{\psi} : \tilde{Y} \to \tilde{E},$$

где $E = \{p(z_+ e_г); \ p(z_- e_н); \ p(z_+ e_н); \ p(z_- e_г)\}$ — вероятностное множество результатов контроля;
$\tilde{E} = \{(< z_+, e_г >, \mu_R(< z_+, e_г >)); (< z_-, e_н >, \mu_R(< z_-, e_н >)); (< z_+, e_н >, \mu_R(< z_+, e_н >)); (< z_-, e_г >, \mu_R(< z_-, e_г >))\}$
— множество бинарных нечетких отношений R результатов контроля;

$\mu_R(<z_+, e_г>)$, $\mu_R(<z_-, e_г>)$ — функция принадлежности бинарных нечетких отношений результатам контроля „годен“; $\mu_R(<z_-, e_н>)$, $\mu_R(<z_+, e_н>)$ — „не годен“.

Требуется определить достоверность результата контроля „годен“ аппаратных средств $d_г$.

Комбинированная модель процесса оценивания достоверности контроля. Обычно контроль объекта заключается в проверке отдельных подсистем и блоков. Космический аппарат представляет собой сложный объект контроля. Контроль технического состояния КА включает контроль отдельных подсистем, состоящих из микроконтроллеров сбора и обработки информации, приемного и передающего устройств, бортовой ЭВМ, комплектов аналоговых и цифровых датчиков, компонентов системы электропитания и ряда других устройств, поведение которых в ряде случаев не может быть полностью представлено только мерами вероятности или возможности [1]. Поэтому комбинированная нечетко-вероятностная модель процесса оценивания достоверности контроля (далее — модель контроля) для безусловных ошибок и достоверностей принимает вид, представленный на рисунке.



Отличительной особенностью модели контроля является зависимость результата „годен“ от вероятностного и нечеткого описания технических состояний составных блоков объекта. Безусловные ошибки на рисунке обозначены как A и B — при вероятностной оценке, и $\tilde{A}$, $\tilde{B}$ — при нечеткой оценке достоверности контроля.

Рассмотрим объект контроля, который состоит из m отдельно проверяемых блоков. В случае вероятностной оценки для $n<m$ блоков вероятность события „объект исправен“ (z_+) есть произведение вероятностей событий „блок i исправен“, а вероятность результата контроля „объект годен“ равна произведению вероятностей результатов „блок i годен“, $i=\overline{1, n}$, т.е.

$$p(z_+)=p(z_{+_1})p(z_{+_2})...p(z_{+_n});$$

$$p(e_г)=p(e_{г_1})p(e_{г_2})......p(e_{г_n}).$$

Отсюда следует выражение для определения достоверностей контроля объекта:

$$d_г=p(z_+e_г)=1-p(z_-e_г)=p(z_{+_1}z_{+_2}...z_{+_n}e_{г_1}e_{г_2}...e_{г_n})=\prod_{i=1}^{n}d_{г_i},$$

т.е. показатель достоверности результата контроля „годен“ равен произведению соответствующих показателей достоверности контроля блоков [2, 3].

В случае нечеткой оценки для $k = m - n$ блоков нечеткое множество состояний объекта $\tilde{Z}$ есть объединение множеств $\tilde{Z}_{+_i}$ — состояние „блок i исправен“ и $\tilde{Z}_{-_i}$ — состояние „блок i не исправен“, $i = \overline{n+1, m}$, т.е. можно представить в виде событий:

$$\tilde{Z} = \tilde{Z}_{+_i} \cup \tilde{Z}_{-_i} = \tilde{Z}_{+_1} \cap \tilde{Z}_{+_2} \cap \ldots \cap \tilde{Z}_{+_m} \cup \tilde{Z}_{-_1} \cap \tilde{Z}_{-_2} \cap \ldots \cap \tilde{Z}_{-_m};$$
$$\mu_{\tilde{Z}}(z_{+_i}) = \min(\mu_{\tilde{Z}_{+_1}}(z_+), \mu_{\tilde{Z}_{+_2}}(z_+), \ldots, \mu_{\tilde{Z}_{+_m}}(z_+));$$
$$\mu_{\tilde{Z}}(z_{-_i}) = \min(\mu_{\tilde{Z}_{-_1}}(z_-), \mu_{\tilde{Z}_{-_2}}(z_-), \ldots, \mu_{\tilde{Z}_{-_m}}(z_-)).$$

Таким же образом можно представить результаты контроля:

$$\tilde{E} = \tilde{E}_{\text{г}_i} \cup \tilde{E}_{\text{н}_i} = \tilde{E}_{\text{г}_1} \cap \tilde{E}_{\text{г}_2} \cap \ldots \cap \tilde{E}_{\text{г}_m} \cup \tilde{E}_{\text{н}_1} \cap \tilde{E}_{\text{н}_2} \cap \ldots \cap \tilde{E}_{\text{н}_m};$$
$$\mu_{\tilde{E}}(e_{\text{г}_i}) = \min(\mu_{\tilde{E}_{\text{г}_1}}(e_\text{г}), \mu_{\tilde{E}_{\text{г}_2}}(e_\text{г}), \ldots, \mu_{\tilde{E}_{\text{г}_m}}(e_\text{г}));$$
$$\mu_{\tilde{E}}(e_{\text{н}_i}) = \min(\mu_{\tilde{E}_{\text{н}_1}}(e_\text{Н}), \mu_{\tilde{E}_{\text{н}_2}}(e_\text{н}), \ldots, \mu_{\tilde{E}_{\text{н}_m}}(e_\text{н})).$$

В данном случае достоверность контроля определяется как минимум нечетких бинарных отношений $R = \left\{ < z_{+_i}, e_{\text{г}_i} >, \mu_R(< z_{+_i}, e_{\text{г}_i} >) \right\}$ событий „объект исправен“ и „объект годен“ [4], т.е.

$$\tilde{d}_\text{г} = \mu_R(< z_{+_i}, e_{\text{г}_i} >) = \min_{i = n+1, \ldots, m} (\mu_R(< z_{+_i}, e_{\text{г}_i} >), \ldots, \mu_R(< z_{+_m}, e_{\text{г}_m} >)).$$

Здесь $\mu_R(< z_{+_i}, e_{\text{г}_i} >)$ — функция принадлежности бинарного нечеткого отношения, которая определяется как отображение $\mu_R : \tilde{Z}_+ \times \tilde{E}_\text{г} \to [0,1]$, при этом $z_{+_i} \in \tilde{Z}_+$ и $e_{\text{г}_i} \in \tilde{E}_\text{г}$.

Обработка данных при оценивании достоверности контроля. При наличии разнородной информации о системе оценка значений ДК может производиться с помощью нечетких и вероятностных мер. Возникает задача комбинирования оценок достоверности контроля аппаратных средств, которая решается двумя способами.

1. Дефаззификация — приведение нечетких оценок к четкости в случае доминирования экспериментальных данных о наработке элементов и подчинение выборки наблюдений одному из законов распределения наработки на отказ [5].

2. Комбинированный метод — в случае преобладания экспертных данных [1]. Основная идея заключается в том, что нечеткая переменная времени до отказа рассматривается как совокупность детерминированных величин τ_-, каждая из которых характеризуется возможностью $f(\tau_-)$, что в моменты времени τ_- объект контроля „не исправен“. Так как детерминированная величина является случайной с плотностью распределения $\delta_{\tau_-}(t)$ (импульсная функция), то получим нечеткое множество $\tilde{F}$ случайных переменных с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{F}}(t) = f(\tau_-)$. Нечеткий показатель вероятности исправной работы элемента до момента времени t определяется как нечеткое число $\tilde{Z}_+$ с функцией принадлежности

$$\mu_{\tilde{Z}_{+_m}}(z_+) = \sup_{\tau_- \geq 0} \left\{ \mu_{\tilde{F}}(\tau_-) \middle| \int_0^\infty \delta_{\tau_-}(t + a) da = z_{+_m} \right\},$$

где a — переменная интегрирования, отражающая время функционирования объекта до последнего момента контроля.

Таким же образом определяется нечеткий показатель вероятности результата контроля „объект годен“ только в качестве детерминированной величины рассматриваются моменты времени, в которые объект контроля „не годен“:

$$\mu_{\tilde{E}_{\text{г}_m}}(e_\Gamma) = \sup_{\tau_\text{н} \ge 0} \left\{ \mu_{\tilde{F}}(\tau_\text{н}) \middle| \int_0^\infty \delta_{\tau_\text{н}}(t+a)da = e_{\text{г}_m} \right\}.$$

Следующая задача — представить вероятностные характеристики элемента в виде нечетких показателей вероятностей произвольных событий. Пусть теперь время до отказа является неотрицательной случайной переменной t_o с плотностью распределения вероятности $g(t)=P\{t_\text{o}=t\}$. Тогда вероятность исправной работы определяется как

$$p(z_+) = \int_0^\infty g(t+a)da .$$

Введем фиктивный нечеткий показатель вероятности исправной работы $p(z_+)$ как нечеткое число с функцией принадлежности

$$\mu_{\tilde{Z}_{+_n}}(z_+) = \begin{cases} 1, \text{ если } z_+ = p(z_{+_n}), \\ 0, \text{ иначе.} \end{cases}$$

Для нечеткого показателя вероятности результатов контроля „объект годен“ формула примет вид

$$\mu_{\tilde{E}_{\text{г}_n}}(e_\text{г}) = \begin{cases} 1, \text{ если } e_\text{г} = p(e_{\text{г}_n}), \\ 0, \text{ иначе.} \end{cases}$$

Рассмотренный прием позволяет записать общую формулу для вычисления достоверности контроля при унифицированном нечетком представлении величин:

$$\tilde{d}_\text{г} = \mu_R(<z_{+_i}, e_{\text{г}_i}>) = \min_{i=1,\dots,n,n+1,\dots,m} (\mu_R(<z_{+_i}, e_{\text{г}_i}>), \dots, \mu_R(<z_{+_n}, e_{\text{г}_n}>),$$
$$\mu_R(<z_{+_{n+1}}, e_{\text{г}_{n+1}}>), \dots, \mu_R(<z_{+_m}, e_{\text{г}_m}>)).$$

Пример. Найти нечеткие показатели исправной и неисправной работы за время t=6 ч элемента, время до отказа которого описывается функцией распределения возможностей $f(t)=\exp(-(t-D)^2/H)$ и функцией плотности распределения вероятности $g(t)=C\exp(-t/D)$ с параметрами распределения C=0,1, D=10, H=25.

Решение. Используя полученные соотношения, можно записать $\mu_{\tilde{F}}(t) = f(t)$, тогда

$$\mu_{\tilde{Z}_+}(z_+) = \sup_{\tau_- \le 6} \mu_{\tilde{F}}(x_-) = 0{,}527; \quad \mu_{\tilde{Z}_-}(z_-) = \sup_{\tau_- > 6} \mu_{\tilde{F}}(x_-) = 1.$$

При вероятностном описании объекта получим $p(z_+)=\exp(-t/10)$, тогда $p(z_+)$=0,548 и

$$\mu_{\tilde{Z}_+}(z_+) = \begin{cases} 1, \text{ если } z_+ = 0{,}548, \\ 0, \text{ иначе.} \end{cases}$$

Заключение. Предложена система нечетких показателей достоверности контроля сложных систем, которая позволяет определять достоверность в условиях неопределенности ситуации из-за отсутствия исчерпывающих данных о техническом состоянии аппаратных средств. Разработанная модель процесса оценивания достоверности учитывает различные источники получения информации о составных блоках ОК. Предложен способ комбинирования вероятностных и нечетких оценок достоверности контроля при разнородной исходной информации, обеспечивающий получение объективных оценок при вероятностно-нечетком описании объекта контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Уткин Л. В.* Методы и модели анализа надежности и безопасности информационных систем при неполной информации. Дис. д-ра техн. наук. СПб: СПбГЛА, 2001. 300 с.

2. *Евланов Л. Г.* Контроль динамических систем. М.: Наука, 1979. 432 с.

3. *Кудрявцев В. В., Белозеров В. А.* Достоверность диагностирования технического состояния сложных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 1997. Т. 40, № 8. С. 38—48.

4. *Леоненков А. В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб: БХВ-Петербург, 2003. 736 с.

5. *Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С.* Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 284 с.

Сведения об авторах

Анатолий Михайлович Барановский — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем подготовки и пуска ракет и космических аппаратов, Санкт-Петербург; E-mail: bamvka@mail.ru

Вячеслав Алексеевич Белозеров — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем подготовки и пуска ракет и космических аппаратов, Санкт-Петербург; E-mail: belozerov@inbox.ru

Дмитрий Иванович Опрышко — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем подготовки и пуска ракет и космических аппаратов, Санкт-Петербург; E-mail: dmopry@yandex.ru

Рекомендована Ученым советом
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
20.10.08 г.