

УДК 629.76.001.4

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ АГРЕГИРОВАННЫХ МНОГОМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ИХ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПРОГРАММЫ ПРОВЕРКИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

Н. Н. Нестечук

Первый Государственный испытательный космодром МО РФ
Российская Федерация, Архангельская область, г. Мирный, ул. Неделина, 35
E-mail: wind.space @ yandex.ru

Предлагается методика преобразования агрегированных многомерных моделей в одномерные за счёт применения характеристических векторов и теории нечётких множеств. Результатом оптимизации является возможность диагностирования бортовой аппаратуры ракеты космического назначения (РКН), представленной агрегированными многомерными моделями, с применением методов анализа одномерных моделей, что приведёт к сокращению времени определения причины неисправности бортовой аппаратуры РКН. Полученная агрегированная одномерная модель применяется для построения программы диагностирования по критерию максимума полезности информации с использованием меры Харкевича.

Ключевые слова: агрегированная модель, мера Харкевича, бортовая аппаратура РКН, диагностирование.

TECHNIQUE OF AGGREGATED MULTIVARIATE MODELS OPTIMIZATION FOR THEIR APPLICATION WHILE BUILDING THE PROGRAM OF CHECKING DIAGNOSTIC FEATURES

N. N. Nestechuk

1 State Test Cosmodrome Defense Ministry Russian Federation
35, Nedelina str., Mirny-12, Arkhangelsk region, Russian Federation
E-mail: wind.space @ yandex.ru

The article suggests the method of converting aggregate multidimensional models into one-dimensional models through the use of feature vectors and theories of fuzzy sets. The result to optimize is the ability of diagnostics of board equipment space launch vehicle (SLV) presented the aggregated multivariate models with application of methods analysis of one-dimensional models, which would reduce the time determine the cause fault of onboard equipment SLV. The obtained aggregated one-dimensional model is applied to build a program diagnosing by maximum information criterion using by Kharkevich's measures.

Keywords: aggregate model, Kharkevich's measure, airborne equipment SLV, diagnosis.

Причиной проведения анализа летно-технических характеристик ракеты космического назначения (РКН) на активном участке траектории полёта являются нештатные ситуации при запуске РКН. В этом случае необходимо четко распознавать технические состояния РКН, выводящей КА на заданную орбиту, с целью выявления возможных аварийных ситуаций на борту РКН или определения вида внешнего воздействия.

При возникновении и развитии на РКН нештатной ситуации (НШС) сложность проведения и актуальность оперативного анализа значительно возрастают, так как последствия способны существенно повлиять как на возможность планового запуска других РКН, так и на общую безопасность их проведения.

Существующие подходы анализа НШС, опирающиеся на использование знаний экспертов, не позволяют достичь требуемой оперативности и достовер-

ности [1]. Известные методы построения программ диагностирования основаны на описании систем агрегированными одномерными моделями (АОМ), в то время как реальные системы описываются агрегированными многомерными моделями (АММ) [2].

В данной статье представлена методика построения многомерной модели сложной технической системы, которой является РКН, переход от многомерной к одномерной модели и вычисление достоверности определения НШС с использованием нечётких множеств.

Математическая модель бортовой автоматизированной системы управления (БАСУ) РКН представлена в виде:

$$M_o^* = \langle \mathbf{E}, \mathbf{L}, \mathbf{H}, \mathbf{G}, \mathbf{M}, \mathbf{\Phi} \rangle, \quad (1)$$

где $\mathbf{E} = \{E^{*i}\}$ – множество классов модельных неисправных состояний блоков объекта диагностирования

(ОД), $E^{*i} = \{E_u^i\}$ – множество состояний объекта диагностирования, $E_u^i = \{e_{cu}^i\}$ – множество значений точек контроля (признаков), которые принимают значения «1» (норма) или «0» (не норма), $e_{cu}^i \in [0,1], i = \overline{1,m}, c = \overline{1,w}, u = \overline{1,q}$; $\Pi = \{p_c\}$ – множество признаков ОД; $\mathbf{H} = \{H^i\}$ – множество характеристических векторов, $H^i = \{h_c^i\}$ – прямой характеристический вектор, содержащий в себе характерные признаки класса неисправных состояний E^{*i} ; $\mathbf{G} = \{G^i\}$ – множество характеристических векторов, $G^i = \{g_c^i\}$ – обратный характеристический вектор, содержащий в себе характерные признаки класса неисправных состояний E^{*i} для значений, противоположных исходным данным; $\mathbf{M} = \{\mu_c(E^{*i})\}$ – множество функций принадлежности вектора текущего неисправного состояния $Y = (y_1, y_2, \dots, y_w)^T$ к модельным состояниям E^{*i} ; $\Phi: \mathbf{E} \times \mathbf{E} \rightarrow \{\mathbf{H}, \mathbf{G}, \mathbf{M}\}$ – сжимающее отображение, согласно которому $h_c^i = \varphi_1(E_u^i), g_c^i = \varphi_2(\overline{E_u^i}), \mu_c^i = \varphi_3(E_u^i) | E_u^i \in E^{*i}$.

Модель процесса диагностирования БАСУ РКН представлена в виде

$$M_{\Pi}^* = \langle Y, \mathbf{R}, \hat{\Pi}, \hat{P}, \mathbf{M} \rangle, \quad (2)$$

где $V = \{Y | Y = (y_1, y_2, \dots, y_c, \dots, y_w)^T, y_c \in \mathbf{R}, c = \overline{1,w}\}$ – множество (в общем случае бесконечное) наблюдаемых состояний объекта, подлежащих распознаванию; $\mathbf{R} = \{R_k | R_k \in \mathbf{S}\}$ – алгебра событий, заданная на множестве \mathbf{S} , в которой элементы R_k – информационные состояния процесса поиска, в одном из которых находится наблюдаемое состояние объекта; $\hat{P} = \{P(R_k) | R_k \in \mathbf{R}\}$ – вероятностная мера, заданная на алгебре событий, в которой вероятности $P(R_k) \in \hat{P}$ вычисляются в процессе синтеза поиско-

вой системы и в качестве исходных данных не выдаются; $\hat{\Pi} = \{\hat{p}_c | c = \overline{1,w}\}$ – множество проверок признаков $p_c \in \Pi$; $\mathbf{M} = \{\mu_c(E^{*i}) | c = \overline{1,w}, i = \overline{1,m}\}$ – множество функций принадлежности вектора текущего неисправного состояния $Y = (y_1, y_2, \dots, y_c, \dots, y_w)^T$ к модельным состояниям $E^{*i}, \mu_c(E^{*i}) \in (0,1)$.

Математическая модель БАСУ РКН (1) соответствует агрегированной многомерной модели [2], в которой для каждого блока составляется отдельная таблица неисправности ($E^{*i} | i = \overline{1,m}$), содержащая данные о состоянии точек контроля p_c , при возникновении неисправности внутри i -го блока (табл. 1). Поэтому количество векторов неисправных состояний $\{E_u^i | u = \overline{1,q}\}$ блока зависит от структуры блока и от точности анализа блока экспертами.

Представленная модель (1) имеет значительную размерность, что позволяет получить из диагностируемой системы максимум информации. Значения e_{uc}^i диагностических признаков p_c – бинарные и равны 1 при норме или 0 при не норме показаний контролируемых датчиков.

Данный подход позволяет использовать для контроля датчики, измеряющие разные физические величины (давление, напряжение, ток, скорость, ускорение и т. д.).

Для перехода от АММ к АОМ необходимо объединить сначала технические состояния модели, а затем диагностические признаки по методу сжимающих отображений [2].

Отображение $\Phi: \mathbf{E} \times \mathbf{E} \rightarrow \{\mathbf{H}, \mathbf{G}, \mathbf{M}\}$ преобразует пространство значений диагностических признаков \mathbf{E} во множества \mathbf{H} и \mathbf{G} (характеристические векторы) [3] и множество \mathbf{M} (функций принадлежности) [3; 4] посредством операторов перехода:

$$\begin{aligned} \varphi_1(E_u^i) &= h_c^i = \bigcap_{u=1}^q e_{uc}^i, & \varphi_2(\overline{E_u^i}) &= g_c^i = \bigcap_{u=1}^q \overline{e_{uc}^i}, \\ \varphi_3(E_u^i) &= \mu_c^i = \frac{1}{q} \bigcap_{u=1}^q e_{uc}^i, & c &= \overline{1,w}, \quad i = \overline{1,m}. \end{aligned} \quad (3)$$

Таблица 1

Агрегированная многомерная модель блока исследуемой системы

		E^{*i}	Π				
			Π_1	Π_2	...	Π_c	...
Исходные данные	E^{*1}	e_{11}^1	e_{12}^1	...	e_{1c}^1	...	e_{1w}^1
	E^{*2}	e_{21}^2	e_{22}^2	...	e_{2c}^2	...	e_{2w}^2

	E^{*u}	e_{u1}^u	e_{u2}^u	...	e_{uc}^u	...	e_{uw}^u

Расчетные данные	H^i	h_1^i	h_2^i	...	h_c^i	...	h_w^i
	G^i	g_1^i	g_2^i	...	g_c^i	...	g_w^i
	$\mu(E^{*i})$	$\mu_1(E^{*i})$	$\mu_2(E^{*i})$...	$\mu_c(E^{*i})$...	$\mu_w(E^{*i})$

Множество диагностических признаков Π сжимается через отображение $\Psi: \Pi \rightarrow \Pi$ посредством оператора перехода:

$$\Psi_j = \bigcap_{c=1}^w \Pi_c, \text{ если } (\Pi_c \in S^j), \quad (4)$$

где $\{\Psi_j \subset \Pi\}$ – множество признаков, сгруппированных по принадлежности к блокам ОД S^i , $\Psi = \{\Psi_j\}$.

Полученное множество Ψ состоит из элементов Ψ_j , содержащих в себе признаки, принадлежащие одному блоку ОД. В соответствии с формулой (4) происходит сжатие множества Π , результатом которого является АОМ ОД:

$$H \xrightarrow{\Psi_j} S = \{S_{i,j}\}, \text{ где } S_{i,j} = \prod_{x \in \Psi_j} h_x^i, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Расчитанные характеристические вектора S_i сгруппированы в табл. 2, используемой при построении программы диагностирования по максимуму полезности информации. В результате всех преобразований получена упрощённая модель ОД, но с сохранением максимальной информативности:

$$M_o = \langle S, \Pi, P, F \rangle, \quad (6)$$

где $S = \{S_i\}$ – множество возможных видов технических состояний (модельных ТС) при заданной глубине поиска $i = \overline{1, m}$, где m – количество блоков в диагностируемой системе; $\Pi = \{\pi_j\}$ – множество признаков, на котором все ТС $S_i \in S$ дизъюнкты (попарно различимы), задается не в явной форме, а таблично, $j = \overline{1, n}$, где n – количество диагностируемых признаков; $P = \{p_i\}$ – множество вероятностей безотказной работы блоков исследуемой системы, задается таблично; $F: S \times \Pi \rightarrow S_{i,j}$ – отображение, согласно которому $S_{i,j} = F(S_i, \pi_j)$, $S_i \in S$, $\pi_j \in \Pi$, $S_i = \{S_{ij}\}$ – множество модельных значений признаков π_j в модельном состоянии S_i , причем $S_{ij} \in [0, 1]$.

Для построения программы диагностирования исследуемой системы по агрегированной ОМ применяется метод динамического программирования по кри-

терию максимума полезности информации, получаемой при проведении проверки [5; 6]. Исходными данными метода являются агрегированная одномерная модель исследуемой системы S и вероятность безотказной работы приборов системы, указанной в документации, p_i , что позволяет повысить достоверность принятия решения о причине неисправности.

Множество вероятностей $\hat{P} = \{P(S_i) | S_i \in S\}$ модельных состояний S рассчитывается по заданным значениям $P = \{p_i\}$ при использовании формул [2]

– для исправного состояния S_0 :

$$P(S_0) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^m \frac{1-p_i}{p_i}}; \quad (7)$$

– и для состояний S_i :

$$P(S_i) = \frac{1-p_i}{1 + \sum_{i=1}^m \frac{1-p_i}{p_i}}, \quad (8)$$

и составляющих полную группу случайных событий, т. е. таких, что $\sum_{i=0}^m P(S_i) = 1$.

Степень близости наблюдаемого неисправного состояния Y^H к классам ТС $E^{*i} \in E$ оценивается по относительному расстоянию между Y^H и функцией принадлежности $\mu(E^{*i})$ [4]. В качестве меры близости принято относительное евклидово расстояние (квадратичное) [7]:

$$e(Y^H, \mu(E^{*i})) = \frac{1}{w} \sqrt{\sum_{c=1}^w (Y_c^H - \mu_c(E^{*i}))^2}, i = \overline{1, m}. \quad (9)$$

Тогда степень истинности принятия решения $Q^i \in Q$ об определении класса технического состояния $E^{*i} \in E$ по наблюдаемому состоянию Y^H определяется по формуле $D(Q^i) = 1 - e(Y^H, \mu(E^{*i}))$.

Полученная методика перехода от многомерных к одномерным агрегированным моделям расширяет количество известных методов диагностирования, основанных на агрегированных одномерных моделях.

Таблица 2

Агрегированная одномерная модель исследуемой системы

S	Π						P
	π ₁	π ₂	...	π _j	...	π _n	
S ₀	s ₀₁	s ₀₂	...	s _{0j}	...	s _{0n}	
S ₁	s ₁₁	s ₁₂	...	s _{1j}	...	s _{1n}	p ₁
S ₂	s ₂₁	s ₂₂	...	s _{2j}	...	s _{2n}	p ₂
...
S _i	s _{i1}	s _{i2}	...	s _{ij}	...	s _{in}	p _i
...
S _m	s _{m1}	s _{m2}	...	s _{mj}	...	s _{mn}	p _m

Применение методики характеристических векторов и метода сжимающих отображений сокращает множество модельных состояний до размеров АОМ, а функция принадлежности, являющаяся основой теории нечетких множеств и показывающая степень принадлежности значения диагностического признака его модельному состоянию, сохраняет максимум информации о системе, повышая достоверность определения причины НШС.

Апробация разработанной методики проводилась с использованием БАСУ РКН «Союз-2».

Из состава системы управления РКН была взята подсистема электропитания, состоящая из 6 сменных блоков, для определения работоспособности которой используется 18 телеметрических признаков p_c (точек контроля). В систему вводились неисправности входящих в неё блоков. Значения, снимаемые в точках контроля p_c , преобразуются в бинарный вид и заносятся в матрицы состояния E^{*i} диагностируемой системы. На их основе, по разработанной методике вычисляется одномерная агрегированная модель S системы электропитания (СЭП) РКН с размерностью 6 на 7 (6 точек контроля – по числу сменных блоков, 7 состояний системы: 6 состояний соответствуют неисправным состояниям блоков и одно состояние – исправное). Программа диагностирования U , определяющая порядок проверки блоков СЭП, строится по методу вычисления максимума функции полезности [5] на основе полученной модели S .

Эффективность полученной программы диагностирования U при диагностировании неисправности СЭП БАСУ проверялась с привлечением специалистов отдела анализа 1 ГИК МО РФ. Были созданы три рабочие группы:

– первая группа состояла из специалистов, хорошо знакомых с тестируемой системой (стаж 5–8 лет), которая при диагностировании неисправности пользуется только своими знаниями;

– вторая группа состояла из специалистов, имеющих небольшой опыт работы (стаж 1–2 года), которая при диагностировании неисправности пользуется рассчитанной программой диагностирования;

– третья группа состояла из специалистов по другим системам РКН «Союз-2», не знакомых с СЭП БАСУ, которая при диагностировании неисправности так же пользуется рассчитанной программой диагностирования, как и вторая группа.

Результатом эксперимента стало сокращение времени поиска причины неисправности при применении разработанной методики в 1,5–2 раза во второй и третьей группе относительно первой.

Сокращение времени поиска неисправности во второй группе относительно третьей не такое большое – 10 %, это объясняется тем, что в третьей группе работали специалисты, не знакомые с СЭП БАСУ, и у них возникали сомнения при принятии решения о неисправности того или иного блока.

Таким образом, разработанную методику можно применить в системах поддержки принятия решения.

Библиографические ссылки

1. Бородавкин В. А., Нестечук Н. Н. Задача повышения оперативности определения нештатных ситуаций на активном участке траектории полета ракеты космического назначения // Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения : сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. СПб., 2013.
2. Дмитриев А. К., Юсупов Р. М. Идентификация и техническая диагностика : учебник для вузов. Л. : МО СССР, 1987. 521 с.
3. Щербakov С. В. Методика диагностирования сложных технических систем с применением нечетко-множественного подхода // Промышленные АСУ и контроллеры. 2008. № 11. С. 18.
4. Аверкин А. Н. [и др.]. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д. А. Поспелова. М. : Наука, 1986. 312 с.
5. Дмитриев А. К., Стрельников В. В. Алгоритм синтеза оптимальной поисковой системы по критерию Харкевича при многозначном представлении информационных признаков // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. / под ред. И. А. Кудряшова ; МО РФ. 2003. Вып. 21. С. 52.
6. Дмитриев А. К. Модели и методы анализа технического состояния бортовых систем : учеб. пособие. СПб. : ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 1999.
7. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. М. : Радио и связь, 1982. 432 с.

References

1. Borodavkin V. A., Nestechuk N. N. [The task of expediting of the definition of abnormal situations at the boost phase of a flight launch vehicle]. *Sb. trudov vsereossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Teoreticheskiye i prikladnyye problemy razvitiya i sovershenstvovaniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya voyennogo naznacheniya"* [Collection of works of All-Russian Scientific Conference "Theoretical and applied problems of development and improvement of the automated control systems military purpose"]. St. Petersburg, 2013. (In Russ.)
2. Dmitriev A. K., Jusupov R. M. *Identifikatsiya i tekhnicheskaja diagnostika. Uchebnik dlja vuzov* [Identification and technical diagnostics. Textbook for high schools]. Leningrad, MO SSSR Publ., 1987, 521 p.
3. Shcherbakov S. V. [Technique of diagnosing complex technical systems using fuzzy- set approach]. *Promyshlennyye ASU i kontrollery*. 2008, no. 11, p. 18. (In Russ.)
4. Averkin A. N., Batyrsin I. Z., Blishun A. F., Silov V. B., Tarasov V. B. *Nechetkie mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta*. [Fuzzy sets in management models and artificial intelligence]. Red. D. A. Pospelova. Moscow, Nauka Publ., 1986, 312 p.
5. Dmitriev A. K., Strel'nikov V. V. [Algorithm for the synthesis optimal search engine by Kharkevich with multivalued representation of information signs]. *Sbornik*

algoritmov i programm tipovykh zadach [Collection of algorithms and programs of common tasks]. 2003, Vol. 21, p. 52. (In Russ.)

6. Dmitriev A. K. *Modeli i metody analiza tekhnicheskogo sostoyaniya bortovykh sistem*. [Models and methods of analysis of the technical state of the

onboard systems]. St. Petersburg, VIKU im. A. F. Mozhayskogo Publ., 1999.

7. Kofman A. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv* [Introduction to the theory of fuzzy sets]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982, 432 p.

© Нестечук Н. Н., 2014

УДК 629.78; 004.94

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА*

Л. Ф. Ноженкова, О. С. Исаева, Е. А. Грузенко

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
E-mail: expert@icm.krasn.ru

Рассматриваются архитектура, функциональные задачи и принципы построения программно-математической модели командно-измерительной системы космического аппарата. Назначение модели – поддержка конструирования бортовой аппаратуры.

Представлена имитационная модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата. Модель содержит инструменты графического представления всех этапов прохождения пакетов телекоманд и телеметрии.

Ключевые слова: программно-математическая модель, космический аппарат, командно-измерительная система, имитационное моделирование, пакеты телекоманд и телеметрии.

DESIGNING AND CONSTRUCTING OF THE PROGRAM-MATHEMATICAL MODEL FOR THE SPACECRAFT COMMAND AND MEASURING SYSTEM

L. F. Nozhenkova, O. S. Isaeva, E. A. Gruzenko

Institute of computational modelling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: expert@icm.krasn.ru

The functional scheme, tasks and programming strategy for designing the program-mathematical model of the spacecraft command-measuring systems are considered. The model purpose is to support the space-system engineering and testing the onboard hardware by the information technologies and mathematical modeling. The functional tasks and principles of the model software are proposed. The model architecture is a software package that allows to simulate and to analyze the hardware structure and functions by using the information, simulation, graphical and analytical methods. The model contains the tools for the graphical representation of all stages of command and telemetry packets transmission. Simulation model allows reproducing the work of the real system, without the presence of onboard equipments of the command-and-measuring system. The program-mathematical model will be used in the designers work simplification. Also it will be used for executing the verification tests and in the training mode – to solve teaching and research tasks.

Keywords: program and mathematical model, spacecraft, command and measuring system, simulation modeling, telecommand and telemetry packets.

Создание высокотехнологичного производства современной бортовой аппаратуры космического аппарата в большой степени опирается на программно-математическое моделирование технических уст-

ройств. Использование программно-математической модели позволяет ускорить и значительно удешевить процессы конструирования бортовых комплексов [1].

Командно-измерительная система (КИС) предна-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (договор № 02.G25.31.0041).