

DOI: 10.12731/2227-930X-2022-12-3-94-108

УДК 621.396.6.07.019.3

ЗАДАЧА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА КОНСТРУКЦИИ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

П.В. Калашиников

В работе приводится описание процесса выбора оптимального варианта конструкции сложной технической системы в условиях интервальной неопределенности и неполноты информации о параметрах и фазовом состоянии. Подобного сорта проблемы являются крайне актуальными на начальном этапе проектирования сложных систем, когда из множества возможных вариантов нужно отобрать те, которые в большей степени соответствуют предъявляемым разнородным критериям качества и в большей степени не всегда отвечают неоднозначным предпочтениям лица принимающего решение.

Целью исследования является разработка эффективных методов сравнения различных вариантов конструкций сложных систем на начальном этапе проектирования в условиях интервальной неопределенности. К задачам проводимого исследования следует отнести построение математической модели функционирования сложной системы в условиях неопределенности, а также анализ основных методов сравнения альтернатив при разнородных критериях качества.

Материалы и методы. В статье дается описанием модели функционирования сложной технической системы в условиях неопределенности, а также описываются основные методы сравнения различных вариантов конструкции системы на начальных этапах проектирования в условиях неполноты и неопределенности информации, а также неоднозначности предпочтений лица, принимающего решение.

Научная новизна реализуемого подхода состоит в использовании аппарата интервального анализа, позволяющего наиболее корректно учитывать имеющие место возможные погрешности, связанные с измерением значений характеристик изучаемых технических систем на всех этапах процесса проектирования.

Обсуждение и заключение. Разработанная в ходе выполненного исследования математическая модель процесса функционирования сложной технической системы в условиях интервальной неопределенности позволяет осуществлять отбор вариантов конструкции системы на начальных этапах проектирования, учитывая возможные погрешности и неточности, возникающие в связи с отклонением значений от расчетных номинальных значений.

Ключевые слова: проектирование сложных систем; интервальная неопределенность; принцип Парето; разнородные критерии качества

THE PROBLEM OF CHOOSING THE OPTIMAL DESIGN OPTION FOR A COMPLEX SYSTEM UNDER CONDITIONS OF INTERVAL UNCERTAINTY

P.V. Kalashnikov

The paper describes the process of choosing the optimal design option for a complex technical system under conditions of interval uncertainty and incomplete information about the parameters and the phase state. Problems of this kind are extremely relevant at the initial stage of designing complex systems, when from a variety of possible options it is necessary to select those that are more consistent with the heterogeneous quality criteria and do not always meet the ambiguous preferences of the decision maker.

The aim of the study is to develop effective methods for comparing various design options for complex systems at the initial design stage under conditions of interval uncertainty. The objectives of the study include the construction of a mathematical model for the functioning

of a complex system under conditions of uncertainty, as well as the analysis of the main methods for comparing alternatives with heterogeneous quality criteria.

Materials and Methods. *The article provides a description of the functioning model of a complex technical system under conditions of uncertainty, and also describes the main methods for comparing various options for the system design at the initial stages of design in conditions of incompleteness and uncertainty of information, as well as ambiguity of the preferences of the decision maker.*

Results. *The scientific novelty of the implemented approach lies in the use of interval data statistics, which allow the most correct consideration of possible errors associated with measuring the values of the characteristics of the studied technical systems at all stages of the control process.*

The scientific novelty of the implemented approach lies in the use of the interval analysis apparatus, which makes it possible to most correctly take into account the possible errors associated with measuring the values of the characteristics of the studied technical systems at all stages of the design process.

Discussion and Conclusions. *The mathematical model of the process of functioning of a complex technical system under conditions of interval uncertainty developed in the course of the study allows selection of system design options at the initial stages of design, taking into account possible errors and inaccuracies arising from the deviation of values from the calculated nominal values.*

Keywords: *design of complex systems; interval uncertainty; Pareto principle; heterogeneous quality criteria*

Введение

Проектирование сложных технических систем ответственного назначения представляет собой комплексную проблему, решение которой требует совместного применения основных принципов системного подхода, а также математического аппарата, адекватным образом описывающего процесс функциони-

рования подобного сорта систем [1-3]. Особенную актуальность данная проблематика приобретает, когда идет речь о выборе оптимального варианта конструкции системы в условиях неопределенности и неполноты информации о значениях параметрах и фазовом состоянии.

Выбор математического аппарата, адекватным образом описывающего процесс функционирования подобного сорта систем, как правило, основан на применении методов интервального анализа и теории нечетких множеств [4, 5].

На начальном этапе проектирования сложных технических систем возможны ситуации, когда лицо, принимающее решение о выборе того или другого варианта конструкции не имеет четкого представления о том, какой именно из них предпочесть. Задача оптимального выбора конструкции системы в этом случае связана с перебором большого количества альтернатив, удовлетворяющих нескольким критериям качества в условиях слабой структурированности, неполноты и неопределенности информации о параметрах системы и ее фазовом состоянии.

Математическая модель функционирования сложной системы в условиях интервальной неопределенности

Рассмотрим общую математическую модель функционирования сложной системы в условиях интервальной неопределенности.

Пусть, система S состоит из M элементов и функционирует в моменты времени t , $0 \leq t \leq T$. Элементы системы взаимодействуют между собой по каналам связи, соединяющим их контактные компоненты. Если элемент B_j , $j=1, M$ имеет k_j контактных входных компонентов, то контакт номер i , $i=1, k_j$ в момент времени t принимает входное значение $X_i^{(j)}(t) \in [X_i^{(j)}(t), X_i^{(j)}(t)]$, где $X_i^{(j)}(t)$, $X_i^{(j)}(t)$ соответственно нижняя и верхняя граница интервала допустимых значений для рассматриваемого показателя. Для случая, когда элемент B_j имеет m_j выходных контактных компонентов контакт номер k , $k=1, m_j$ в момент времени t выдает выходное воздействие $Y_k^{(j)}(t) \in [Y_k^{(j)}(t), Y_k^{(j)}(t)]$, где $Y_k^{(j)}(t)$, $Y_k^{(j)}(t)$ соответственно нижняя и верхняя граница интервала допустимых значений для данной величины.

Границы интервалов значений для рассматриваемых величин определяются допустимым отклонением параметров системы от расчетных номинальных показателей, при которых данный технический объект сохраняет свою работоспособность. Число входных и выходных контактных компонентов известно и определяется заранее в ходе процесса проектирования системы.

В дальнейшем при описании модели функционирования сложной системы в условиях неопределенности предполагается реализация следующих условий. Любой входной контактный компонент каждого элемента системы соединен каналом связи не более чем с одним выходным контактным компонентом другого элемента.

Внешняя среда при построении модели системы S рассматривается в качестве фиктивного элемента B_0 . Пусть, вход и выход данного элемента содержит соответственно n_0 и m_0 контактных компонентов.

Введем следующие обозначения.

$X_l^{(0)}$ – входной контактный компонент номер l элемента B_0 ,
 $l = 1, k_0$;
 $Y_k^{(0)}$ – выходной контактный компонент номер k элемента B_0 ,
 $k = 1, m_0$;

В момент времени t , $0 \leq t \leq T$ выходное воздействие системы S на внешнюю среду описывается с помощью интервального вектора

$$X_t^{(0)} = ([X_1^{(0)}(t), \overline{X_1^{(0)}(t)}], \dots, [X_{k_0}^{(0)}(t), \overline{X_{k_0}^{(0)}(t)}]) \quad (1)$$

где $[\underline{X_l^{(0)}(t)}, \overline{X_l^{(0)}(t)}]$ – интервал допустимых значений для входных воздействий в момент времени t на контактный компонент элемента B_0 с номером l .

В момент времени t , $0 \leq t \leq T$ воздействие внешней среды на систему S описывается в виде интервального вектора значений для выходных контактных компонентов элемента B_0 следующего вида

$$Y_t^{(0)} = ([Y_1^{(0)}(t), \overline{Y_1^{(0)}(t)}], \dots, [Y_{m_0}^{(0)}(t), \overline{Y_{m_0}^{(0)}(t)}]) \quad (2)$$

где $[\underline{Y_k^{(0)}(t)}, \overline{Y_k^{(0)}(t)}]$ – интервал допустимых значений для выходных

воздействий на контактном компоненте элемента B_0 с номером k в момент времени t .

Взаимодействие между элементами сложной технической системы S , а также между системой и внешней средой описывается с помощью множества контактных компонентов данной системы, а также закона преобразования входных воздействий в выходные.

Введем обозначения.

$X^{(j)}$ – множество входных контактов элемента системы S номер j , $j=0, M$;

$Y^{(j)}$ – множество выходных контактов элемента системы S номер j , $j=0, M$;

X – множество всех входных контактных компонентов системы S ;

Y – множество всех выходных контактных компонентов системы S ;

Множества $X^{(j)}$ и $Y^{(j)}$, X , Y имеют вид

$$X^{(j)} = \{X_1^{(j)} \dots X_{k_j}^{(j)}\} = \{X_i^{(j)}\}_{i=1}^{k_j} \quad (3)$$

$$Y^{(j)} = \{Y_1^{(j)} \dots Y_{m_j}^{(j)}\} = \{Y_i^{(j)}\}_{i=1}^{m_j} \quad (4)$$

$$X = \bigcup_{j=0}^M (X^{(j)}) \quad (5)$$

$$Y = \bigcup_{j=0}^M (Y^{(j)}) \quad (6)$$

В момент времени t , $0 \leq t \leq T$ множество входных воздействий в системе S задается в виде набора интервальных векторов $X(t)$ следующего вида

$$\begin{aligned} X(t) = & (\overline{[X_l^{(0)}(t), X_l^{(0)}(t)]}, \dots, \overline{[X_{k_0}^{(0)}(t), X_{k_0}^{(0)}(t)]}, \\ & \overline{[X_1^{(1)}(t), X_1^{(1)}(t)]}, \dots, \overline{[X_{k_1}^{(1)}(t), X_{k_1}^{(1)}(t)]}, \dots, \\ & \overline{[X_l^{(M)}(t), X_l^{(M)}(t)]}, \dots, \overline{[X_{k_M}^{(M)}(t), X_{k_M}^{(M)}(t)]}). \end{aligned} \quad (7)$$

где

$\overline{[X_1^{(j)}(t), X_1^{(j)}(t)]}, \dots, \overline{[X_{k_j}^{(j)}(t), X_{k_j}^{(j)}(t)]}$ – множество интервалов допустимых значений для входных воздействий на контактных компонентах элемента B_j , $j=0, M$ в момент времени t ,

В момент времени t , $0 \leq t \leq T$ множество выходных воздействий в системе S задается в виде набора интервальных векторов $Y(t)$ следующего вида

$$\begin{aligned}
 Y(t) = & ((\overline{[Y_1^{(0)}(t), Y_1^{(0)}(t)]}, \dots, \overline{[Y_{m_0}^{(0)}(t), Y_{m_0}^{(0)}(t)]}, \\
 & (\overline{[Y_1^{(1)}(t), Y_1^{(1)}(t)]}, \dots, \overline{[Y_{m_1}^{(1)}(t), Y_{m_1}^{(1)}(t)]}, \dots, \\
 & (\overline{[Y_l^{(M)}(t), Y_l^{(M)}(t)]}, \dots, \overline{[Y_{m_M}^{(M)}(t), Y_{m_M}^{(M)}(t)]})).
 \end{aligned} \tag{8}$$

$(\overline{[Y_1^{(j)}(t), Y_1^{(j)}(t)]}, \dots, \overline{[Y_{m_j}^{(j)}(t), Y_{m_j}^{(j)}(t)]})$ – множество интервалов допустимых значений для выходных воздействий на контактных компонентах элемента $B_j, j=\overline{0, M}$ в момент времени t

В момент времени t схема сопряжения элементов системы задается с помощью оператора F следующего вида

$$Y_l^{(k)}(t) = F(X_i^{(j)}(t)), k, j = \overline{1, M}, l = \overline{1, m_k}, i = \overline{1, k_j} \tag{9}$$

где

$$\begin{aligned}
 X_i^{(j)}(t) & \in [\overline{X_i^{(j)}(t)}, \overline{X_i^{(j)}(t)}], \\
 Y_l^{(k)}(t) & \in [\overline{Y_l^{(k)}(t)}, \overline{Y_l^{(k)}(t)}].
 \end{aligned}$$

Каждому входному значению контактного компонента элемента номер $j X_i^{(j)}(t)$ в момент времени t ставится в соответствие выходное значение контактного компонента элемента номер $k Y_l^{(k)}(t)$ рассматриваемое в данный момент времени.

Если контактный компонент $X_i^{(j)}$ не связан ни с одним выходным контактным компонентом, то оператор сопряжения F не определен.

Использование информации о составе множеств X и Y , описывающих совокупность входных и выходных контактных компонентов элементов системы S , а также применение оператора сопряжения F позволяет описать процесс взаимодействия между элементами рассматриваемой системы, а также ее структуру.

Результаты исследования

Принятие решений в условиях неопределенности является сложной комплексной задачей, требующей учета множества факторов. Особенную актуальность данная проблема принимает при решении задачи выбора оптимального варианта конструкции сложной системы на начальных этапах проектирования, так как

лицу принимающему решение приходится делать выбор из большого количества альтернатив, удовлетворяющих, как правило, набору разнородных критериев качества.

Выбор оптимального варианта конструкции системы требует разработки методов сравнения и определения предпочтения между разными альтернативами в условиях неопределенности и нечеткости предпочтений одних из них перед другими.

Достаточно часто при проектировании сложных технических систем ответственного назначения необходимо учитывать неопределенность, связанную с тем, что ряд параметров принимает свои значения в рамках заранее заданных интервалов, соответствующих областям работоспособности, а не отдельным точечным показателям. Учет подобного фактора неопределенности важен при решении задач многокритериальной оптимизации, в которых необходимо выбрать наилучший вариант конструкции системы, удовлетворяющий одновременно множеству разнородных критериев качества.

Введем следующие обозначения:

$V = \{V_\beta, \beta = \overline{1, N}\}$ – множество возможных вариантов конструкции сложной технической системы;

$R_i(V_\beta) = [\underline{R}_i(V_\beta), \overline{R}_i(V_\beta)]$ – интервал допустимых значений критерия качества номер i для альтернативы $V_\beta, \beta \in V$;

K – общее количество критериев качества, которым должна удовлетворять проектируемая система S ;

$\underline{R}_i(V_\beta)$ – нижняя граница интервала допустимых значений для варианта V_β по критерию номер $i, i = \overline{1, K}$;

$\overline{R}_i(V_\beta)$ – верхняя граница интервала допустимых значений для варианта V_β по критерию номер $i, i = \overline{1, K}$;

$R(V_\beta)$ – векторный критерий.

Векторный критерий $R(V_\beta)$ задается в виде интервального вектора следующего вида

$$R(V_\beta) = (R_1(V_\beta), R_2(V_\beta), \dots, R_k(V_\beta)) = ([\underline{R}_1(V_\beta); \overline{R}_1(V_\beta)], [\underline{R}_2(V_\beta); \overline{R}_2(V_\beta)], \dots, [\underline{R}_K(V_\beta); \overline{R}_K(V_\beta)]) \quad (10)$$

Рассмотрим множество $\frac{1}{p}V$ Парето-оптимальных вариантов реализации системы S , удовлетворяющих условию

$$V_{k_1} > V_{k_2} > \dots > V_{k_p}, V_{k_i} \in \frac{1}{p}V, \quad (11)$$

Задача выбора оптимального варианта конструкции системы в условиях интервальной неопределенности формализуется следующим образом.

Необходимо найти упорядоченный набор Парето-оптимальных вариантов конструкции системы, удовлетворяющих условию (11) и являющихся решением следующих оптимизационных задач

$$R_i(V_{k_j}) = \min\{R_i(V_\beta)\}; V_{k_j} \in \frac{1}{p}V, i=\overline{1, K}, \beta = \overline{1, N} \quad (12)$$

$$R_i(V_{k_j}) = \max\{R_i(V_\beta)\}; V_{k_j} \in \frac{1}{p}V, i=\overline{1, K}, \beta = \overline{1, N} \quad (13)$$

Основные подходы к построению оптимальных кортежей Парето описаны в работах [6-15].

Для решения задачи поиска оптимальных кортежей Парето воспользуемся следующим алгоритмом, введя обозначения

M_0 – множество вариантов системы, участвующих на начальном этапе перебора;

M_L – множество вариантов системы на этапе перебора № L;

M_{L_0} – множество вариантов системы, появившихся на этапе перебора № L, про которые не было сведений на начальном этапе процесса перебора вариантов

$$M_{L_0} \cap M_0 = \emptyset \quad (14)$$

Рассмотрим возможные варианты соотношения мощностей множеств M_0 и M_L, M_{L_0} на этапе перебора альтернатив № L.

$$1) |M_L| = |M_0|, M_{L_0} = \emptyset \quad (15)$$

$$2) |M_0| > |M_L| \quad (16)$$

Число систем на этапе перебора номер L меньше, чем на начальном этапе перебора.

$$3) |M_0| \neq |M_L|, M_L \neq \emptyset, M_{L_0} \neq \emptyset \quad (17)$$

Учитываются системы, имеющиеся на начальном этапе, а также вновь появившиеся

$$4) |M_L| = \emptyset, M_{L_0} \neq \emptyset \quad (18)$$

Все варианты системы реализуются на этапе номер L.

Если выполнено условие (15), то выбирается вариант системы, занимающий первое место в кортеже $\frac{1}{p}V$ на начальном этапе.

При выполнении условия (16) из кортежа ${}_p^1V$ удаляются все возможные варианты конструкции системы, соответствующие множеству $M_0 \setminus M_L$.

В случае реализации условия (17) выполняется построение кортежа Парето ${}_{p}^{M_{L_0}}V$ представляющего собой результат анализа систем, входящих в множество $M_L \cup M_{L_0}$. Элемент № 1 данного кортежа является искомым.

Заключение

В ходе проведенного исследования описаны основные подходы к решению задачи выбора оптимального варианта конструкции сложной технической системы в условиях интервальной неопределенности и неполноты информации о значениях параметров и фазовом состоянии. Построенная математическая модель сложной системы в условиях интервальной неопределенности позволяет делать выбор оптимального варианта конструкции системы. Разработанный алгоритм выбора позволяет учитывать наличие разнородных критериев качества, которым должна удовлетворять проектируемая система в условиях неопределенности. В основе данного алгоритма лежат методы гипервекторного ранжирования критериев, а также моделирования сложных систем в условиях интервальной неопределенности.

Список литературы

1. Белкин А.Р., Левин М.Ш. Принятие решений: комбинаторные модели аппроксимации информации. М.: Наука, 1990. 160 с.
2. Гришко А.К. Анализ применения методов и положений теории статистических решений и теории векторного синтеза для задач структурно-параметрической оптимизации // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 4 (16). С. 26–34..
3. Grishko A.K. Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions / A.K. Grishko, I.I. Kochegarov, N.V. Goryachev // XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). Russia, May 24–26, 2017. Saint Petersburg, 2017. P. 210–212.

4. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: Издат. XYZ, 2015. 606 с.
5. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
6. Воронов Е.М., Карпунин А.А. Многокритериальное комплексирование облика сложной системы управления на основе гипервекторного выбора // Интеллектуальные системы: Тр. Десятого международного симпозиума / Под ред. К. А. Пупкова. М.: РУСАКИ, 2012. С. 338–342.
7. Сафронов В. В. Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования: Монография. Саратов: Научная книга, 2009. 329 с.
8. Сафронов В.В., Федорец О.Н. Метод построения эффективных моделей разработки программного обеспечения // Информационные технологии. 2010. №1. С. 34–39.
9. Сафронов В. В. Сравнительная оценка методов «жесткого» ранжирования и анализа иерархий в задаче гипервекторного ранжирования систем // Информационные технологии. 2011. №7. С. 8–13.
10. Гришко А. К. Выбор оптимальной стратегии управления надежностью и риском на этапах жизненного цикла сложной системы // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 2 (18). С. 26–31
11. Гришко А.К. Анализ надежности структурных элементов сложной системы с учетом интенсивности отказов и параметрической девиации // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 3 (19). С. 130–137.
12. Grishko A. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10, № 23. P. 43842–43845.
13. Ведерников Ю.В. Научно-методический аппарат векторного предпочтения сложных технических систем, характеризующихся показателями качества, заданными в ограниченно-неопределенном виде / Ю.В. Ведерников, В.В. Могиленко // Вопросы современной

- науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского. Системный анализ. Автоматизированное управление. 2011. № 1 (32). С. 81–96.
14. Ногин В.Д. Сужение множества Парето: аксиоматический подход. М.: Физматлит, 2016. 272 с.
 15. Подиновский В.В, Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Физматлит, 2007. 256 с.
 16. Katendi B.A., Umnov E.A., Umnov A.E. Optimization of the Shape of the Pareto Set in the Problems of Multi-criterial Programming // Review of Business and Economics Studies. 2018. Vol. 6(1). P. 5-16.
 17. Ногин В.Д. Логическое обоснование принципа Эджворта-Парето // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2002. Т. 42. №7. С. 951-957.
 18. Березкин В. Е., Каменев Г. К., Лотов А. В. Гибридные адаптивные методы аппроксимации невыпуклой многомерной границы Парето // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2006. Т. 46. № 11. С. 2009–2023.
 19. Lotov A., Berezkin V., Kamenev G., Miettinen K. Optimal Control of Cooling Process in Continuous Casting of Steel Using a Visualization-Based Multi-Criteria Approach // Applied Mathematical Modelling. 2005. Vol. 29. No. 7. P. 653-672.

References

1. Belkin A. R, Levin M. Sh. *Prinyatie resheniy: kombinatornye modeli approksimatsii informatsii* [Decision making: combinatorial models of information approximation] М.: Nauka, 1990, 160 p.
2. Grishko A. K. Analiz primeneniya metodov i polozheniy teorii statisticheskikh resheniy i teorii vektornogo sinteza dlya zadach strukturno-parametricheskoy optimizatsii [Analysis of the application of methods and provisions of the theory of statistical decisions and the theory of vector synthesis for problems of structural-parametric optimization]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 4 (16), pp. 26–34.
3. Grishko A.K., Kochegarov I.I., Goryachev N.V. Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions. *XX IEEE International Conference on Soft Computing*

- and Measurements (SCM). Russia, May 24–26, 2017. Saint Petersburg, 2017, pp. 210–212.*
4. Sharyy S.P. *Konechnomernyy interval'nyy analiz* [Finite-dimensional interval analysis]. Novosibirsk: Publishing house XYZ, 2015, 606 p.
 5. Zade L.A. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy* [The concept of a linguistic variable and its application to the adoption of approximate decisions]. M.: Mir, 1976, 165 p.
 6. Voronov E. M., Karpunin A. A. *Mnogokriterial'noe kompleksirovanie oblika slozhnoy sistemy upravleniya na osnove gipervektornogo vybora* [Multi-criteria complexing of the appearance of a complex control system based on hypervector choice]. *Intellektual'nye sistemy: Tr. Desyatogo mezhdunarodnogo simpoziuma* [Intelligent systems: Tr. Tenth International Symposium] / Ed. K. A. Pupkova. M.: RUSAKI, 2012, pp. 338–342.
 7. Safronov V. V. *Osnovy sistemnogo analiza: metody mnogovektornoy optimizatsii i mnogovektornogo ranzhirovaniya*: [Fundamentals of system analysis: methods of multi-vector optimization and multi-vector ranking]. Monograph. Saratov: Nauchnaya kniga, 2009, 329 p.
 8. Safronov V.V. Fedorets O.N. *Metod postroeniya effektivnykh modeley razrabotki programmnoy obespecheniya* [A method for constructing effective models of software development]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2010, no. 1, pp.34–39.
 9. Safronov V.V. *Sravnitel'naya otsenka metodov «zhestkogo» ranzhirovaniya i analiza ierarkhiy v zadache gipervektornogo ranzhirovaniya sistem* [Comparative evaluation of methods of “hard” ranking and analysis of hierarchies in the problem of hypervector ranking of systems]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2011, no. 7, pp. 8–13.
 10. Grishko A.K. *Vybor optimal'noy strategii upravleniya nadezhnost'yu i riskom na etapakh zhiznennogo tsikla slozhnoy sistemy* [Selection of the optimal strategy for managing reliability and risk at the stages of the life cycle of a complex system]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 2 (18), pp. 26–317.

11. Grishko A.K. Analiz nadezhnosti strukturnykh elementov slozhnoy sistemy s uchetom intensivnosti otkazov i parametricheskoy devyatsii [Reliability analysis of structural elements of a complex system, taking into account the intensity of failures and parametric deviation]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society]. 2016, no. 3 (19), pp.130–137.
12. Grishko A. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 23, pp. 43842–43845.
13. Vedernikov Yu.V. Nauchno-metodicheskiy apparat vektornogo predpochteniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem, kharakterizuyushchikhya pokazatelyami kachestva, zadannymi v ogranichenno-neopredelennom vide [Scientific and methodological apparatus of vector preference for complex technical systems characterized by quality indicators specified in a limited-indefinite form] / Yu.V. Vedernikov, V.V. Mogilenko. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki* [Questions of modern science and practice], 2011, no. 1 (32), pp. 81–96.
14. Nogin V.D. *Suzhenie mnozhestva Pareto: aksiomaticheskiy podkhod* [Narrowing the Pareto set: an axiomatic approach]. Moscow: Fizmatlit, 2016, 272 p.
15. Podinovskiy V.V, Nogin V.D. *Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach* [Pareto-optimal solutions of multiobjective problems]. M.: Fizmatlit, 2007, 256 p.
16. Katendi B.A., Umnov E.A., Umnov A.E. Optimization of the Shape of the Pareto Set in the Problems of Multi-criterial Programming. *Review of Business and Economics Studies*, 2018, vol. 6(1), pp. 5-16.
17. Nogin V.D. Logicheskoe obosnovanie printsipa Edzhvorta-Pareto [Logical substantiation of the Edgeworth-Pareto principle]. *Zh. vychisl. matem. i matem. fiz.*, 2002, vol. 42, no. 7, pp. 951-957.
18. Berezkin V. E., Kamenev G. K., Lotov A. V. Gibridnye adaptivnye metody approksimatsii nevyukloy mnogomernoy granitsy [Pareto Hybrid adaptive methods for approximating a nonconvex multidimension-

al Pareto frontier]. Zh. vychisl. matem. i matem. fiz., 2006, vol. 46, no. 11, pp. 2009–2023.

19. Lotov A., Berezkin V., Kamenev G., Miettinen K. Optimal Control of Cooling Process in Continuous Casting of Steel Using a Visualization-Based Multi-Criteria Approach. *Applied Mathematical Modelling*, 2005, vol. 29, no. 7, pp. 653-672.

ДААННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Калашников Павел Викторович, младший научный сотрудник
Федеральное государственное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН)
ул. Радио, 5, г. Владивосток, 690041, Российская Федерация
kalashnikovpv@iacp.dvo.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Pavel V. Kalashnikov, junior researcher
Institute for Automation and Control processes, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russian Federation
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-5424-1635>
kalashnikovpv@iacp.dvo.ru

Поступила 15.07.2022

После рецензирования 30.07.2022

Принята 02.08.2022

Received 15.07.2022

Revised 30.07.2022

Accepted 02.08.2022