УДК 075.8: 007: 004.3: 518.81 DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-14

А. К. Гришко, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛИЗА СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИИ[1]

A. K. Grishko, I. I. Kochegarov, A. V. Lysenko

MULTICRITERIAL CHOICE OF THE OPTIMAL VARIANT OF A COMPLEX TECHNICAL SYSTEM BASED ON THE INTERVAL ANALYSIS OF WEAKLY STRUCTURED INFORMATION

Аннотация. ***Актуальность и цели***. Объектом исследования являются сложные технические системы, которые характеризуются разнородными критериями качества и параметрами, заданными диапазонами их изменений. Предметом исследования являются многофункциональные модели формирования и ранжирования вариантов систем. Цель работы состоит в разработке методики выбора предпочтительного варианта системы по совокупности разнородных критериев качества, заданных в интервальном виде. ***Материалы и методы***. Предлагаемый подход базируется на комплексном применении методов интервального анализа, теории нечетких множеств и теории принятия решений. Анализ табличных данных основан на применении теории матриц. ***Результаты***. Разработан способ нормализации разнородных критериев качества, основанный на построении отношений предпочтения интервального вида. Построение комплексного вектора критериев качества позволяет получить методику многокритериального выбора варианта сложной радиоэлектронной системы на множестве возможных альтернатив. ***Выводы***. В отличие от известных методов с жестким ранжированием, метод построения предпочтений интервального вида на множестве альтернативных вариантов систем по векторным разнородным критериям качества предлагает вместо коэффициентов, учитывающих важность критериев, применять функции принадлежности, которые показывают степень близости варианта реализации систем к эффективному или Парето-оптимальному вариантам. Рассмотрен пример оптимального построения радиоэлектронной системы, но предлагаемый метод может найти применение не только в технике, но также и при решении других прикладных задач оптимизации в экономике или социальной сфере.

Abstract. ***Background***. The object of the research is complex technical systems that are characterized by heterogeneous quality criteria and parameters set by the ranges of their

---

[1] Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Адаптивная интеллектуальная система вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и авиационной техники нового поколения на основе многофункциональной цифровой генерации испытательных сигналов» (Соглашение № 17-79-10281 от 24.07.2017) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

changes. The subject of the study are multifunctional models for the formation and ranking of system variants. The aim of the work is to develop a methodology for selecting the preferred system variant for a set of heterogeneous quality criteria specified in interval form. ***Materials and methods***. The proposed approach is based on the complex application of methods of interval analysis, fuzzy sets theory and decision theory. Analysis of tabular data is based on the application of the theory of matrices. ***Results***. A method for normalizing heterogeneous quality criteria is developed based on the construction of preferences relations of interval type. The construction of a complex vector of quality criteria allows one to obtain a methodology for multi-criteria choice of a variant of a complex radio electronic system on a set of possible alternatives. ***Conclusions***. Unlike well-known methods with rigid ranking, the method of constructing interval-type preferences on a set of alternative variants of systems based on vector heterogeneous quality criteria suggests using membership functions that instead of factors taking into account the importance of criteria that show the degree of proximity of the implementation of systems to the effective or Pareto-optimal variants . An example of the optimal construction of a radio electronic system is considered in the article, but the proposed method can find application not only in engineering, but also in solving other applied optimization problems in the economy or social sphere.

Ключевые слова: сложная техническая система, критерии качества, интервальный анализ, векторная оптимизация.

Key words: complex technical system, quality criteria, interval analysis, vector optimization.

Введение

На ранних этапах проектирования сложных технических систем (СТС) очень важно определить оптимальный вариант структуры из множества их возможных альтернатив. Этот выбор осуществляется по множеству разнородных критериев качества, которые могут задаваться:

– в формализованном, количественном виде;
– в неопределенном, лингвистическом виде;
– в частично формализованном виде.

В процессе решения этой задачи часто оказывается, что большое количество показателей исследуемых СТС заданы в виде диапазонов изменения их величин. Например, у радиоэлектронной системы (РС) это диапазоны рабочих частот, полоса пропускания, значения и диапазоны изменения входных и выходных параметров сигнала, эксплуатационные пределы перепадов температур в узлах и модулях РС, вес, стоимость и т.д.

Это создает определенные трудности при выборе оптимальной структуры СТС, которые связаны с тем, что сложно объективно сравнивать улучшение значения некоторого критерия с ухудшением значения другого критерия, если эти критерии представлены в измерительных шкалах, имеющих разнородный характер.

Для нахождения решений в задачах подобного класса можно использовать нечеткие [1, 2] и интервальные методы [3–5].

Международный стандарт на обозначения в интервальном анализе был принят на заседании рабочей группы по стандартизации интервальных вычислений IEEE P1788 в конце 2008 г. (IEEE Interval Standard Working Group – P1788).

Методы оптимизации сложных систем по критериям оптимальности интервального вида получили свое развитие в 90-х гг. прошлого столетия, но в то же время все проблемы еще до конца не решены и очень часто встречаются при решении прикладных задач оптимизации.

Предлагаемый в статье метод позволяет производить многокритериальное ранжирование альтернативных вариантов СТС, которые характеризуются интервальными характеристиками, путем приведения к единой величине и виду исходных данных, удобных для сравнения.

Постановка задачи

При моделировании реальных систем могут быть такие ситуации, когда у лица, принимающего решение (ЛПР), нет четкого представления об отношении предпочтения между всеми или некоторыми альтернативами, а можно лишь оценить степень выполнения того или иного предпочтения между парами альтернатив в виде числа из интервала [0;1]. В таком случае с помощью ЛПР (или эксперта) можно ввести нечеткое отношение предпочтения.

Нечетким отношением предпочтения R на множестве X называется нечеткое подмножество декартова произведения $X \times X$, характеризующееся функцией принадлежности μ_R : $X \times X \to [0,1]$. Значение $\mu_R(x, y)$ этой функции понимается как субъективная мера или степень выполнения отношения x к y.

Для решения задачи, позволяющего сравнивать неоднородные критериальные значения, необходимо построить нечеткие отношения предпочтения интервального вида (НОПИВ), для чего введем следующие обозначения на основании [2, 4, 5]: $S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1,n}\}$ – множество возможных альтернативных вариантов структурного построения СТС; $K_i(S_\alpha) = \left[\underline{K_i(S_\alpha)}; \overline{K_i(S_\alpha)}\right]$ – частные критерии оптимальности, заданные в интервальном виде, характеризующие каждый отдельный вариант системы S_α, где $\underline{K_i(S_\alpha)}$ – нижняя граница интервала критериальной оценки, а $\overline{K_i(S_\alpha)}$ – верхняя граница интервала, $i = \overline{1,r}$; $\alpha = \overline{1,n}$; $K(S_\alpha) = \{K_1(S_\alpha), K_2(S_\alpha), \ldots, K_r(S_\alpha)\} = \left\{\left[\underline{K_1(S_\alpha)}; \overline{K_1(S_\alpha)}\right], \left[\underline{K_2(S_\alpha)}; \overline{K_2(S_\alpha)}\right], \ldots, \left[\underline{K_r(S_\alpha)}; \overline{K_r(S_\alpha)}\right]\right\}$ – векторный критерий, характеризующий каждый вариант системы; $S^P \subset S$ – множество эффективных (парето-оптимальных) вариантов системы с числом элементов n^P; $P = \left(S^0_{k_1}, S^0_{k_2}, \ldots, S^0_{k_{n^P}}\right)$ – упорядоченное множество эффективных вариантов (кортеж Парето), для элементов $S^0_{k_j} \in S^P$ которого справедливо

$$S^0_{k_1} \succ S^0_{k_2} \succ \ldots \succ S^0_{k_{n^P}}, \tag{1}$$

где «$\succ$» – знак отношения доминирования, $k_j \in \overline{\{1, n^P\}}$. Длина кортежа равна n^P.

С учетом введенных обозначений сформулируем задачу.

Требуется найти упорядоченное множество эффективных вариантов структурного построения сложной системы (кортеж Парето) (1), для элементов $S^0_{k_j}$ которого в зависимости от смысла задачи выполняются условия:

$$K_i\left(S^0_{k_j}\right) = \underline{\min_{i=\overline{1,r};\, \alpha=\overline{1,n}}} \left[K_i(S_\alpha)\right], S^0_{k_j} \in S^P, \tag{2}$$

или

$$K_i\left(S^0_{k_j}\right) = \underline{\max_{i=\overline{1,r};\, \alpha=\overline{1,n}}} \left[K_i(S_\alpha)\right], S^0_{k_j} \in S^P \tag{3}$$

для случая, когда скалярные критерии оптимальности $K_i(S_\alpha) = \left[\underline{K_i(S_\alpha)}; \overline{K_i(S_\alpha)}\right]$ представлены в интервальном виде.

Обычный (не интервальный) скалярный критерий $K_i(S_\alpha)$ целесообразно рассматривать как частный случай интервального критерия, который представлен в виде вырожденного интервала [1–3], т.е. интервала с совпадающими концами $K_i(S_\alpha) = \underline{K_i(S_\alpha)} = \overline{K_i(S_\alpha)}$.

Построение интервальных отношений предпочтения на множестве сложных систем, характеризующихся скалярными разнородными критериями оптимальности

При построении реальных СТС различного назначения встречаются ситуации (являющиеся, скорее, правилом, чем исключением), когда у ЛПР нет четкого представления о предпочтениях между всеми или некоторыми из альтернативных вариантов [5–7]. Кроме того, только при наличии условия, обеспечивающего сравнимость частных критериев, возможно в дальнейшем построение принципа оптимальности и вытекающих из него алгоритмов решения многокритериальных задач. Несравнимость частных критериев является основной особенностью и главным препятствием к решению задач многокритериальной оптимизации [8–10]. Представленные обстоятельства существенно усиливаются в условиях, когда частные критерии не только неаддитивные, но еще и представлены в интервальном виде, с различными диапазонами отклонения качества от лучшего до худшего значения.

На основе перечисленного выше предлагается на основе анализа множества упорядоченных пар S_k и $S_l\left(S_k \in S \text{ и } S_l \in S, \text{где } k=\overline{1,n};\, l=\overline{1,n};\, k \neq l\right)$ вариантов сложной системы $S=\left\{S_\alpha, \alpha=\overline{1,n}\right\}$ по аналогии с нечеткими отношениями предпочтения [5, п. 1.2.1] ввести отношение предпочтения интервального вида $R^u K_i(S_k,S_l)$ по i-му частному интервальному критерию оптимальности $K_i\left(S_\alpha\right)=\left[\underline{K_i\left(S_\alpha\right)};\overline{K_i\left(S_\alpha\right)}\right]$, $i=\overline{1,r}$, $\alpha=\overline{1,n}$, и для пары систем (S_k,S_l) определить интервальной функцией принадлежности $\mu^u K_i(S_k,S_l)$. Результаты анализа предлагается заносить в специальную оценочную матрицу $\mu^u K_i(S_k,S_l)$. При сравнении систем S_k и S_l k-системы необходимо располагать в строках, а l-системы – в столбцах.

Элементы $\mu^u K_i(S_k,S_l)$ оценочной матрицы с учетом подходов, изложенных в работах [4, 5], определяются по выражению

$$\mu^u K_i\left(S_k,S_l\right)=\frac{K_i\left(S_k\right)-K_i(S_l)}{m_i}=\frac{\left[\underline{K_i\left(S_k\right)};\overline{K_i\left(S_k\right)}\right]-\left[\underline{K_i\left(S_l\right)};\overline{K_i\left(S_l\right)}\right]}{m_i}=$$

$$=\frac{\left[\min\left\{\underline{K_i\left(S_k\right)}-\underline{K_i\left(S_l\right)};\overline{K_i\left(S_k\right)}-\overline{K_i\left(S_l\right)}\right\};\max\left\{\underline{K_i\left(S_k\right)}-\underline{K_i\left(S_l\right)};\overline{K_i\left(S_k\right)}-\overline{K_i\left(S_l\right)}\right\}\right]}{m_i}, \qquad (4)$$

где $K_i\left(S_k\right)$ и $K_i\left(S_l\right)$ – значения i-го скалярного критерия для систем S_k и S_l; m_i – ширина интервала оценок по i-му частному критерию оптимальности [2, 6–8]. Средством числового представления критериев выступают интервальные значения, которые показывают допустимое отклонение качества варианта системы от худшего до лучшего (т.е. от минимального до максимального) в определенном диапазоне.

Важным моментом в данном случае является назначение величины m_i. При необходимости можно использовать в качестве m_i: предельно допустимые значения критериев оптимальности эталонной системы; предельно допустимые значения критериев оптимальности, которые хотелось бы достигнуть в ходе решения задачи оптимизации; в задачах контроля – предельно допустимые значения контролируемых параметров и т.д.

В результате функция принадлежности $\mu^u K_i\left(S_k,S_l\right)$ для пары систем $(S_k;S_l)$, характеризующая степень согласия с тем, что система S_k доминирует над системой S_l по i-му частному интервальному критерию, будет также представлена в интервальном виде:

$$\mu^u K_i\left(S_k,S_l\right)=\left[\underline{\mu^u K_i\left(S_k,S_l\right)};\overline{\mu^u K_i\left(S_k,S_l\right)}\right].$$

Отличительной особенностью рассматриваемого подхода от методов теории нечетких множеств [1, 2, 5] является определение интервальной функции принадлежности в интервале [–1; 1].

Таким образом, нечетким отношением предпочтения интервального вида R^u на множестве S_α называется множество декартова произведения ($S_k \times S_l$, где $k=\overline{1,n}$; $l=\overline{1,n}$; $k \neq l$), характеризующееся интервальной функцией принадлежности $\mu^u K_i(S_k,S_l)$: $S_k \times S_l \to [-1;1]$. Значение этой функции $\mu^u K_i(S_k,S_l) = \left[\underline{\mu^u K_i(S_k,S_l)}; \overline{\mu^u K_i(S_k,S_l)}\right]$ понимается как объективная мера степени выполнения отношения $S_k R^u S_l$ по скалярному критерию оптимальности

$$K_i(S_\alpha) = \left[\underline{K_i(S_\alpha)}; \overline{K_i(S_\alpha)}\right], (i=\overline{1,r}\ ,\alpha=\overline{1,n}),$$

заданному в интервальном виде, характеризующему каждый отдельный вариант системы S_α, где $\underline{\mu^u K_i(S_k,S_l)} \in [-1;0]$ – значение, характеризующее максимальную степень потерь при признании системы S_k, доминирующей систему S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i; $\overline{\mu^u K_i(S_k,S_l)} \in [0;1]$ – значение, характеризующее максимальную степень выигрыша при признании системы S_k, доминирующей систему S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i; $\overline{\mu^u K_i(S_k,S_l)} \in [-1;0]$ означает абсолютное отсутствие доминирования системы S_k над системой S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i; $\underline{\mu^u K_i(S_k,S_l)} \in [0;1]$ означает абсолютное доминирование системы S_k над системой S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i; $\left[\underline{\mu^u K_i(S_k,S_l)}; \overline{\mu^u K_i(S_k,S_l)}\right] \in [-1;1]$ – интервальное значение, характеризующее степень выигрыша и степень потерь при признании системы S_k, доминирующей систему S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i.

Введем отношение строгого интервального предпочтения системы S_k над системой S_l и определим его функцией принадлежности $\mu_D^u K_i(S_k,S_l)$, характеризующей интенсивность доминирования системы S_k над системой S_l по i-му частному интервальному критерию оптимальности в виде

$$\begin{gathered}
\mu_D^u K_i(S_k,S_l) = \mu^u K_i(S_k,S_l) - \mu^u K_i(S_l,S_k) = \\
= \left[\underline{\mu^u K_i(S_k,S_l)}; \overline{\mu^u K_i(S_k,S_l)}\right] - \left[\underline{\mu^u K_i(S_l,S_k)}; \overline{\mu^u K_i(S_l,S_k)}\right] = \\
= [\min\{\underline{\underline{\mu^u K_i(S_k,S_l)} - \underline{\mu^u K_i(S_l,S_k)}}; \underline{\overline{\mu^u K_i(S_k,S_l)} - \overline{\mu^u K_i(S_l,S_k)}}\}; \\
\overline{\max\{\underline{\mu^u K_i(S_k,S_l)} - \underline{\mu^u K_i(S_l,S_k)}; \overline{\overline{\mu^u K_i(S_k,S_l)} - \overline{\mu^u K_i(S_l,S_k)}}\}}\,]
\end{gathered} \tag{5}$$

Результаты сравнения $\mu^u K_i(S_k,S_l)$ и $\mu^u K_i(S_l,S_k), (\forall S_k$ и $S_l)$ будем заносить в оценочную матрицу $\mu_D^u K_i(S_k,S_l)$.

Введем отношение интервального недоминирования системы S_k над системой S_l и определим его функцией принадлежности $\mu_{ND} K_i(S_k,S_l)$ как дополнение к $\mu_D^u K_i(S_k,S_l)$ в виде

$$\mu_{ND} K_i(S_k,S_l) = \begin{cases} 1, \text{ если } \mu_D^u K_i(S_k,S_l) < 0, \\ 1 - \mu_D^u K_i(S_k,S_l), \text{ если } \mu_D^u K_i(S_k,S_l) \geq 0. \end{cases} \tag{6}$$

Степень недоминируемости системы S_k ни одной другой системой по i-му скалярному интервальному критерию оптимальности характеризуется [11–13] функцией принадлежности множеству недоминируемых систем $\mu_D^* K_i(S_k)$ в виде

$$\mu_D^* K_i(S_k) = \min \mu_{ND} K_i(S_k,S_l). \tag{7}$$

Значение функции принадлежности $\mu_D^* K_i(S_k)$ показывает степень близости варианта по рассматриваемому i -му частному интервальному критерию оптимальности.

Если в процессе решения, в зависимости от смысла задачи, необходимо выполнить условие (2), то выбор значения $\mu_D^* K_i(S_k)$ необходимо осуществлять из k -й строки оценочной матрицы $\mu_{ND} K_i(S_k, S_l)$.

Если в процессе решения, в зависимости от смысла задачи, необходимо выполнить условие (3), то выбор значения $\mu_D^* K_i(S_k)$ необходимо осуществлять из l -й строки оценочной матрицы $\mu_{ND} K_i(S_k, S_l)$.

Величину $\mu_D^* K_i(S_k)$ будем рассматривать как меру предпочтения, обеспечивающую объективный и адекватный реальности способ сравнения сложных систем, характеризующий-ся разнородными интервальными критериальными значениями, и устанавливающую значение приоритета при выборе [10, 13–15].

Необходимо отдать предпочтение одной из трех систем $\{S_1, S_2, S_3\}$, характеризующихся четырьмя критериями качества $K_1(S_\alpha), K_2(S_\alpha), K_3(S_\alpha) K_4(S_\alpha)$, значения которых заданы в интервальном виде, остальные системы расположить в порядке убывания предпочтения.

Варианты систем, значения критериев оптимальности и ширина интервала оценок по i -му частному критерию представлены в табл. 1, при этом должны выполняться условия:

$$K_1(S_\propto^*) = \min_{\alpha=\overline{1,3}} \left[K_1(S_\alpha) \right], \tag{8}$$

$$K_2(S_\propto^*) = \max_{\alpha=\overline{1,3}} \left[K_2(S_\alpha) \right], \tag{9}$$

$$K_3(S_\propto^*) = \max_{\alpha=\overline{1,3}} \left[K_3(S_\alpha) \right], \tag{10}$$

$$K_4(S_\propto^*) = \min_{\alpha=\overline{1,3}} \left[K_4(S_\alpha) \right], \tag{11}$$

Таблица 1

Пример многокритериального выбора варианта радиоэлектронной системы

Критерии $K_i(S_\alpha)$	Варианты систем			
	S_1	S_2	S_3	m_i
$K_1(S_\alpha)$ – стоимость (тыс. руб.)	[500; 700]	[400; 900]	[550; 650]	1000
$K_2(S_\alpha)$ – надежность, наработка на отказ (тыс. ч)	[40; 70]	[60; 90]	[50; 80]	100
$K_3(S_\alpha)$ – устойчивость к динамическим нагрузкам (балл)	[5; 7]	[4; 6]	[6; 8]	10
$K_4(S_\alpha)$ – масса (кг)	[5; 8]	[7; 9]	[3; 6]	10

Критерии $K_1(S_\alpha), K_2(S_\alpha), K_3(S_\alpha), K_4(S_\alpha)$ являются разнородными, измеряемыми в различных шкалах, с различными диапазонами отклонения качества. Помимо того, условия (8) и (11) являются диаметрально противоположным условиям (9) и (10).

Порядок решения задачи многокритериального выбора оптимального варианта системы

Используя выражения (4), определяем $\mu^u K_1(S_1, S_2)$:

$$\mu^u K_1(S_1, S_2) = \frac{[500;700]-[400;900]}{1000} = \frac{\left[\underline{\min\{500-400;700-900\}};\overline{\max\{500-400;700-900\}}\right]}{1000} =$$

$$= \frac{[-200;100]}{1000} = [-0,2;0,1].$$

Аналогичным образом рассчитываем данные для $\mu^{u}K_1(S_k,S_l)$, $\mu^{u}K_2(S_k,S_l)$, $\mu^{u}K_3(S_k,S_l)$ и заносим их в табл. 2.

Таблица 2

Оценочная матрица $\mu^{u}K_1(S_k,S_l)$

Варианты систем S_k	Варианты систем S_l		
	S_1	S_2	S_3
$\mu^{u}K_1(S_k,S_l)$			
S_1	–	$[-0,2;\,0,1]$	$[-0,05;\,0,05]$
S_2	$[-0,1;\,0,2]$	–	$[-0,15;\,0,25]$
S_3	$[-0,05;\,0,05]$	$[-0,25;\,0,15]$	–
$\mu^{u}K_2(S_k,S_l)$			
S_1	–	$[-0,2;\,-0,2]$	$[-0,1;\,-0,1]$
S_2	$[0,2;\,0,2]$	–	$[0,1;\,0,1]$
S_3	$[0,1;\,0,1]$	$[-0,1;\,-0,1]$	–
$\mu^{u}K_3(S_k,S_l)$			
S_1	–	$[0,1;\,0,1]$	$[-0,1;\,-0,1]$
S_2	$[-0,1;\,-0,1]$	–	$[-0,2;\,-0,2]$
S_3	$[0,1;\,0,1]$	$[0,2;\,0,2]$	–
$\mu^{u}K_4(S_k,S_l)$			
S_1	–	$[-0,2;\,-0,1]$	$[0,2;\,0,2]$
S_2	$[0,1;\,0,2]$	–	$[0,3;\,0,4]$
S_3	$[-0,2;\,-0,2]$	$[-0,4;\,-0,3]$	–

После этого, используя выражения (5), находим $\mu_D^{u}K_i(S_k,S_l)$:

$$\mu_D^{u}K_1(S_1,S_2)=[-0,2;0,1]-[-0,1;0,2]=$$

$$\left[\min\underline{\{-0,2-(-0,1);0,1-0,2\}};\max\overline{\{-0,2-(-0,1);0,1-0,2\}}\right]=-0,1.$$

Аналогично рассчитывается $\mu_D^{u}K_1(S_k,S_l);\mu_D^{u}K_2(S_k,S_l);\mu_D^{u}K_3(S_k,S_l)$. Полученные данные заносим в табл. 3.

Таблица 3

Оценочная матрица $\mu_D^{u}K_i(S_k,S_l)$

Варианты систем S_k	Варианты систем S_l			
	S_1	S_2	S_3	
1	2	3	4	5
$\mu_D^{u}K_1(S_k,S_l)$				
S_1	–	–0,1	0	
S_2	0,1	–	0,1	
S_3	0	–0,1	–	

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5
$\mu_D^u K_2(S_k, S_l)$				
S_1	–	–0,4	–0,2	
S_2	0,4	–	0,2	
S_3	0,2	–0,2	–	
$\mu_D^u K_3(S_k, S_l)$				
S_1	–	0,2	–0,2	
S_2	–0,2	–	–0,4	
S_3	0,2	0,4	–	
$\mu_D^u K_4(S_k, S_l)$				
S_1	–	–0,3	0,4	
S_2	0,3	–	0,7	
S_3	0,4	–0,7	–	

Используя выражения (6), вычисляем значения $\mu_{ND}K_1(S_k, S_l)$, $\mu_{ND}K_2(S_k, S_l)$, $\mu_{ND}K_3(S_k, S_l)$. Данные заносим в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Оценочная матрица $\mu_{ND}K_1(S_k, S_l)$ и $\mu_{ND}K_4(S_k, S_l)$

Варианты систем S_k	Варианты систем S_l			
	S_1	S_2	S_3	$\mu_D^* K_1(S_k)$
S_1	–	1	1	1
S_2	0,9	–	0,9	0,9
S_3	1	1	–	1
$\mu_D^* K_4(S_k)$				
S_1	–	1	0,6	0,6
S_2	0,7	–	0,3	0,3
S_3	0,6	1	–	0,6

Таблица 5

Оценочная матрица $\mu_{ND}K_2(S_k, S_l)$ и $\mu_{ND}K_3(S_k, S_l)$

Варианты систем S_k	Варианты систем S_l		
	S_1	S_2	S_3
$\mu_{ND}K_2(S_k, S_l)$			
S_1	–	1	1
S_2	0,6	–	0,8
S_3	0,8	1 .	–
$\mu_D^* K_2(S_k)$	0,6	1	0,8
$\mu_{ND}K_3(S_k, S_l)$			
S_1		0,8	1
S_2	1		1
S_3	0,8	0,6	
$\mu_D^* K_3(S_k)$	0,8	0,6	1

$\mu_D^* K_3(S_k)$ для каждого критерия заносим в табл. 6.

Таблица 6

Оценочная матрица $\mu_D^* K_3(S_k)$

Варианты систем S_k	$\mu_D^* K_i(S_k)$			
	$\mu_D^* K_1(S_k)$	$\mu_D^* K_2(S_k)$	$\mu_D^* K_3(S_k)$	$\mu_D^* K_4(S_k)$
S_1	1	0,6	0,8 .	0,6
S_2	0,9	1	0,9	0,3
S_3	1	0,8	1	0,6

Как уже говорилось выше, $\mu_D^* K_i(S_k)$ определяются в диапазоне $[0;1]$, в котором $\mu_D^* K_i(S_k)=1$, значит, система S_k будет являться лучшей по i-му скалярному критерию на множестве рассматриваемых систем, 0 – худшей, а значение из диапазона $[0;1]$ показывает значение величины приоритета системы при выборе. Чем больше это значение, тем предпочтительнее система S_k по i-му скалярному критерию оптимальности.

Таким образом, все интервальные критериальные оценки приведены к общему виду, удобному для сравнения при решении задач многокритериальной оптимизации.

Построение оценочных матриц предпочтения на множестве альтернатив по векторному неоднородному критерию оптимальности

На основе анализа $\mu_D^* K_i(S_k)$ и $\mu_D^* K_i(S_l)$ проведем попарное сравнение систем S_k и S_l и определим элементы C_{kl}^{μ} оценочной матрицы C_{kl}^{μ} (табл. 7), где $k=\overline{1,n}$; $l=\overline{1,n}$; $k \neq l$, по формуле

$$C_{kl}^{\mu} = \sum_{i=1}^{r} \mu_D^* K_i(S_k) \Big/ \sum_{i=1}^{r} \mu_D^* K_i(S_l),\ \ C_{kl}^{\mu} = \frac{1}{C_{lk}^{\mu}};$$

$$C_{12}^{\mu} = \frac{\mu_D^* K_1(S_1)+\mu_D^* K_2(S_1)+\mu_D^* K_3(S_1)+\mu_D^* K_4(S_1)}{\mu_D^* K_1(S_2)+\mu_D^* K_2(S_2)+\mu_D^* K_3(S_2)+\mu_D^* K_4(S_2)} = \frac{1+0,6+0,8+0,6}{0,9+1+0,9+0,3} = 0,968.$$

Таблица 7

Матрица предпочтений C_{kl}^{μ}

Варианты систем S_k	Варианты систем S_l		
	S_1	S_2	S_3
S_1	–	0,968	0,882
S_2	1,033	–	0,911
S_3	1,133	1,097	–

Для формулировки решающих правил вводим систему следующих показателей: $H_{l_j}^{\mu(1)}$ – количество элементов в l-м столбце оценочной матрицы C_{kl}^{μ}, значения которых больше единицы; $M_{l_j}^{\mu(1)}$ – количество элементов в l-м столбце оценочной матрицы C_{kl}^{μ}, значения которых меньше единицы; $C_{kl_j\max}^{\mu}$ – максимальное значение элемента в l-м столбце оценочной матрицы. Физический смысл показателей следующий: $H_{l_j}^{\mu(1)}$ показывает, сколько вариантов из рассматриваемого множества превышают l -й; $M_{l_j}^{\mu(1)}$ – в скольких вариантах доминирует l -я система; $C_{kl_j\max}^{\mu}$ определяет максимальную степень доминирования k -й системы над l -й (табл. 8).

Таблица 8

Матрица показателей доминирования

Варианты систем S_k	Варианты систем S_l		
	S_1	S_2	S_3
$H_{l_j}^{\mu(1)}$	2	1	0
$M_{l_j}^{\mu(1)}$	0		2
$C_{kl_j\max}^{\mu}$	1,133	1,097	0,911

В соответствии с [3, 4] поиск приоритетного распределения систем необходимо проводить только среди эффективных вариантов. Учитывая источники [13, 15], производим построение кортежа Парето: $P=\{S_3,S_2,S_1\}$.

Заключение

Найдено решение важной в прикладном смысле задачи определения отношений предпочтения на множестве альтернативных вариантов сложных систем на основе разнородных критериев оптимальности, заданных в частично формализованном и интервальном виде. Построение кортежа предпочтений сложных систем производится по векторному разнородному критерию оптимальности, и предлагаемый метод может найти широкое применение при решении прикладных задач принятия решений не только в технике, но и других сферах деятельности.

Библиографический список

1. Орловский, С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. – М. : Наука, 1981. – 203 с.
2. Гришко, А. К. Анализ применения методов и положений теории статистических решений и теории векторного синтеза для задач структурно-параметрической оптимизации / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 26–34. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-4-4.
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. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970540.
4. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
5. Гришко, А. К. Динамический анализ и синтез оптимальной системы управления радиоэлектронными средствами / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 141–147.
6. Шарый, С. П. Конечномерный интервальный анализ / С. П. Шарый. – Новосибирск : Издат. XYZ, 2015. – 606 с.
7. Гришко, А. К. Выбор оптимальной стратегии управления надежностью и риском на этапах жизненного цикла сложной системы / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 26–31. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-2-4.
8. Grishko, A. K. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict / A. K. Grishko // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk, Russia, 2016. – Vol. 02. – P. 107–111. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7806423.
9. Grishko, A. Structural and Parameter Optimization of the System of Interconnected Processes of Building Complex Radio-Electronic Devices / A. Grishko, I. Kochegarov, N. Yurkov //

14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), (Zakarpattya), Ukraine, February 21–25. – Polyana, Svalyava, 2017. – P. 192–194. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916112.

10. Гришко, А. К. Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 103–112. DOI: 10.21685/2072-3059-2016-2-9.
11. Гришко, А. К. Анализ надежности сложной системы на основе динамики вероятности отказов подсистем и девиации параметров / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2016. – № 6 (34). – С. 116–121.
12. Гришко, А. К. Алгоритм оптимального управления в сложных технических системах с учетом ограничений / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 1 (21). – С. 117–123.
13. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostilov, N. Yurkov // XIIIth International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET). Lviv-Slavsko, Ukraine. – Lviv, 2016. – P. 214–218. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
14. Гришко, А. К. Анализ надежности структурных элементов сложной системы с учетом интенсивности отказов и параметрической девиации / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 3 (19). – С. 130–137.
15. 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.

Гришко Алексей Константинович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Grishko Aleksey Konstantinovich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кочегаров Игорь Иванович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Kochegarov Igor' Ivanovich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Лысенко Алексей Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Lysenko Aleksey Vladimirovich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 075.8: 007: 004.3: 518.81

Гришко, А. К.

Многокритериальный выбор оптимального варианта сложной технической системы на основе интервального анализа слабоструктурированной информации / А. К. Гришко, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 97–107. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-14.