

А. К. Гришко

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ
НА ОСНОВЕ ИНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЕВИАЦИИ
ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ
В РАЗНОРОДНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ШКАЛАХ**

A. K. Grishko

**SELECTION OF THE OPTIMAL DESIGN
OF THE RADIOELECTRONIC SYSTEM
BASED ON THE INTERVAL ANALYSIS OF THE DEVIATION
OF DESIGN PARAMETERS REPRESENTED
IN DIFFERENT MEASURING SCALES**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассматривается методика многокритериального выбора предпочтительного варианта проектного решения на этапах тестирования опытных образцов радиоэлектронных систем, когда измеряемые и контролируемые проектные параметры отклоняются от значений технического задания и их оптимальные значения уточняются в процессе последующих этапов проектирования. В качестве объекта исследования рассматриваются радиоэлектронные системы, имеющие разнородные по природе параметры, представленные в виде интервальных значений. В качестве предмета исследования рассматривается оптимизационная модель для выбора оптимального проектного решения радиоэлектронной системы по совокупности разнородных параметров, представленных в виде девиационных диапазонов. **Материалы и методы.** Оптимальное проектное решение предлагается находить на основе комплексного применения методов интервального анализа, методов теории принятия решений, а также используя теорию нечетких множеств. **Результаты.** Разработана методика представления и обработки измерительной информации, основанная на введении интервального отношения предпочтения, которая учитывает девиацию проектных параметров опытных образцов радиоэлектронной системы и различного вида неопределенность, связанную с разнородностью параметров и шкал их измерения. Методика позволяет адекватно отражать и сравнивать разнородную измерительную информацию о качестве тестируемых опытных образцов радиоэлектронных систем и при этом обладает математической корректностью и приемлемой точностью. **Выводы.** Методика позволяет более обоснованно и с небольшими затратами получить решение задачи выбора оптимальной конструкции радиоэлектронных систем по результатам анализа измерительной информации, а также снизить количество повторных этапов проектирования, время и финансовые затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Методику предлагается использовать в системах поддержки принятия конструкторских решений на этапах тестирования опытных образцов радиоэлектронной техники.

Abstract. Background. The technique of multi-criteria selection of the preferred design solution is considered at the stages of testing prototypes of electronic systems, when the measured and controlled design parameters deviate from the values of the technical specifications and their optimal values are refined during the subsequent design stages. As an object of study, we consider electronic systems having heterogeneous in nature parameters, presented in the form of interval values. As a subject of research, an optimization model for selecting a prototype of an electronic system is considered. The aim of the work is to develop a methodology for choosing the optimal design solution for a radio-electronic system based on a set of heterogeneous parameters presented in the form of deviation ranges. **Materials and methods.** It is proposed to find the optimal design solution based on the integrated application of interval analysis methods, decision theory methods, and also using the theory of fuzzy sets. **Results.** A technique has been developed for the presentation and processing of measurement information, based on the introduction of an interval preference relationship that takes into account the deviation of the design parameters of the prototypes of the electronic system and various types of uncertainty associated with the heterogeneity of the parameters and scales of their measurement. The technique allows to adequately reflect and compare heterogeneous measuring information about the quality of the tested prototypes of electronic systems and at the same time has mathematical correctness and acceptable accuracy. **Conclusions.** The methodology allows more reasonably and at low cost to obtain a solution to the problem of choosing the optimal design of electronic systems according to the results of the analysis of measurement information, as well as reduce the number of repeated design stages, time and financial costs for research and development work. The methodology is proposed to be used in support systems for making design decisions at the stages of testing prototypes of electronic equipment.

К л ю ч е в ы е с л о в а: девиация, проектные параметры, оптимизация, критерий качества.

Key words: deviation, design parameters, optimization, quality criterion.

Введение

Радиоэлектронные системы (РЭС) имеют, как правило, сложную модульную архитектуру, различные условия эксплуатации и специфичные требования по надежности и эффективности применения. При разработке такой аппаратуры необходимо обеспечить очень большое количество проектных параметров и показателей качества, указанных в техническом задании заказчика. Проектирование таких систем является непростой задачей и регламентируется государственным стандартом, определяющим для этого несколько стадий научно-исследовательских (НИР) и опытно-конструкторских работ (ОКР). Пропуск любой из этих стадий проектирования увеличивает риски и смещает их на финальные этапы серийного производства. Отдельные стадии могут повторяться на итерационно, с переходом к самым первым этапам проектирования, что является нормальным при создании любого технически сложного и конкурентноспособного продукта, но и одновременно увеличивает финансовые и временные затраты на НИР и ОКР.

На этапе тестирования и/или опытной эксплуатации проектные параметры РС часто отклоняются от расчетных и проектировщики рассматривают несколько вариантов конструкций РС, из которых необходимо выбрать оптимальный и доработать его [1]. Практика показывает, что если не учитывать результаты предварительных испытаний или некорректно их анализировать, то последующие финансовые потери могут оказаться значительными. Широкая номенклатура отечественной и зарубежной элементной базы, разные эксплуатационные условия и специфические требования по надежности, а также большое количество типов конструкций усложняют выбор наилучшего проектного решения РЭС для требуемых условий эксплуатации.

Для модулей и компонентов РЭС, которые находятся в стадии разработки, большое количество параметров и показателей качества не имеет четких значений и уточняется в процессе последующих этапов проектирования. Разрабатываемые перспективные радиоэлектронные

системы и модули, функционирование которых, например, основано на новых физических принципах, вообще не имеют аналогов и проектных ограничений на реализацию. Конструкторам приходится учитывать такие показатели и характеристики уже на начальных стадиях проектирования РЭС в виде некоторых диапазонов их возможных изменений, и в таком виде они могут учитываться вплоть до запуска РЭС в серийное производство.

Существует особая группа критериев РЭС, которая имеет слабую формализацию. К таким, например, относятся качественные характеристики продукции: надежность, помехоустойчивость, электромагнитная совместимость, эффективность применения, дизайн, эргономичность, возможность модернизации и т.д. Для их формализации и приближенных решений применяют лингвистические переменные [2].

Но больше всего проектировщикам затрудняет выбор оптимальной конструкции РЭС одновременный учет множества параметров и их разнородность. Если эти критерии представлены в разнородных измерительных шкалах, то конструкторам трудно объективно сравнивать улучшение значения некоторого параметра с ухудшением другого. Именно без наличия условий сравнимости частных критериев невозможно построение принципа оптимальности и основанного на нем алгоритма решения многокритериальных задач. Решение задачи формирования и оптимизации структуры РЭС приходится искать в условиях многокритериальности и неопределенности измерительной информации.

Постановка задачи

Рассмотрим математическую постановку задачи выбора оптимального варианта конструкций радиоэлектронной системы по векторному разнородному критерию качества и частным критериям, представленным диапазонами их изменений. В процессе моделирования реальных систем могут быть такие ситуации, когда у проектировщиков нет четкого представления (информации) 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 $[0;1]$. Основная идея предлагаемой методики состоит в том, чтобы получить возможность сравнения разнородных интервальных критериальных значений путем построения интервальных отношений предпочтения. Для нахождения решений в задачах многокритериальной оптимизации предлагается использовать комплексное применение положений теории принятия решений, нечетких множеств и методов интервального анализа [1–4]. В конце 2008 г. на заседании рабочей группы по стандартизации интервальных вычислений IEEE P1788 в качестве основы для работы с интервальной документацией был принят международный стандарт (IEEE Interval Standard Working Group – P1788), положения которого также учтены в данной работе.

Для решения оптимизационной задачи необходимо произвести построение нечетких отношений предпочтения интервального вида (НОПИВ), а в качестве критериев использовать функции принадлежности, которые будут являться средством количественного сравнения разнородной измерительной информации о качестве проектируемой РЭС.

На основании работ [2–4] введем следующие обозначения: $S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$ – множество возможных альтернативных вариантов проектного решения РЭС; $K_i(S_\alpha) = [\underline{K}_i(S_\alpha); \overline{K}_i(S_\alpha)]$ – частные критерии оптимальности, заданные в интервальном виде, характеризующие каждый отдельный вариант проектного решения S_α , где $\underline{K}_i(S_\alpha)$ – нижняя граница интервала критериальной оценки, а $\overline{K}_i(S_\alpha)$ – верхняя граница интервала; $K(S_\alpha) = \{K_1(S_\alpha), K_2(S_\alpha), \dots, K_j(S_\alpha), \dots, K_r(S_\alpha)\}$ – векторный критерий, характеризующий каждый вариант проектного решения РЭС.

Требуется найти упорядоченное множество вариантов проектного решения радиоэлектронной системы (кортеж Парето) $P = (S_{k_1}^0, S_{k_2}^0, \dots, S_{k_p}^0)$, который ранжируется по отношению доминирования. Для элементов $S_{k_j}^0$ в соответствии со смыслом задачи выполняются условия:

$$K_i(S_{k_j}^0) = \min_{i=1, r; \alpha=1, n} [K_i(S_\alpha)], S_{k_j}^0 \in S^P \text{ или } K_i(S_{k_j}^0) = \max_{i=1, r; \alpha=1, n} [K_i(S_\alpha)], S_{k_j}^0 \in S^P.$$

Критерии качества, представленные в таком виде, рассматриваются как самостоятельные целостные объекты, между которыми в соответствии со смыслом задачи вводятся операции и отношения, использующие терминологию интервальных методов. Отклонения (девиации) проектных параметров и их интервальные величины таким образом полностью характеризуют параметры РЭС, поскольку задаются диапазонами изменения качества от лучшего значения до худшего, и все возможные значения, таким образом, также попадают в этот диапазон.

Математическим и вычислительным аспектам анализа статических систем в условиях неопределенности посвящена работа [4] и, используя этот источник, можно получить алгебраические решения уравнений с интервальными значениями.

Построение интервальных отношений предпочтения

В многокритериальных задачах оптимизации важно обеспечить требование одновременного и единообразного учета частных критериев, задаваемых как на количественном, так и на качественном уровне описания. Наиболее адекватным в таком случае является представление параметров и переменных модели оптимизации РЭС в виде некоторых связанных областей на измерительных шкалах, характеризующих возможные допустимые в конкретном случае значения каждого параметра. Исходная измерительная информация представляется в виде интервалов [4–6], при этом результаты моделирования также будут интервальными значениями, т.е. содержать интервальную неопределенность. Таким образом, анализируя множества упорядоченных пар S_k и S_l вариантов проектного решения системы $S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$ по аналогии с нечеткими отношениями предпочтения [7, 8], вводим нечеткие отношения предпочтения интервального вида $R^u K_i(S_k, S_l)$ по i -му частному интервальному критерию оптимальности $K_i(S_\alpha) = [K_i(S_\alpha); \overline{K_i(S_\alpha)}]$, $i = \overline{1, r}$, $\alpha = \overline{1, n}$ и определим его интервальной функцией принадлежности $\mu^u K_i(S_k, S_l)$. Функции принадлежности определяем по формуле

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

где $K_i(S_k)$ и $K_i(S_l)$ – значения i -го скалярного критерия для систем S_k и S_l ; m_i – ширина шкалы интервальных оценок по i -му частному критерию оптимальности [2, 6–8]. Функция принадлежности также будет иметь интервальный вид: $\mu^u K_i(S_k, S_l) = [\mu^u K_i(S_k, S_l); \overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)}]$ и характеризовать каждый вариант проектного решения РЭС S_α , где:

$\mu^u K_i(S_k, S_l) \in [-1; 0]$ – значение, характеризующее максимальную степень потерь при признании проектного решения РЭС S_k , доминирующей проектному решению РЭС 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 проектного решения РЭС S_k , доминирующей проектному решению РЭС S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ;

$\mu^u K_i(S_k, S_l) \in [-1; 0]$ – значение, характеризующее абсолютное отсутствие доминирования проектного решения РЭС S_k над проектным решением РЭС S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ;

$\overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)} \in [0; 1]$ – значение, характеризующее абсолютное доминирование проектного решения РЭС S_k над проектным решением РЭС S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ;

$[\mu^u K_i(S_k, S_l); \overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)}] \in [-1; 1]$ – интервальное значение, характеризующее степень выигрыша и степень потерь при признании проектного решения РЭС S_k , доминирующей над проектным решением РЭС S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i .

Отношение строгого интервального предпочтения проектного решения РЭС S_k над проектным решением РЭС S_l будет определяться его функцией принадлежности $\mu_D^u K_i(S_k, S_l)$, которая характеризует интенсивность доминирования проектного решения РЭС S_k над проектным решением РЭС S_l по i -му частному интервальному критерию оптимальности в виде

$$\mu_D^u K_i(S_k, S_l) = \mu^u K_i(S_k, S_l) - \mu^u K_i(S_l, S_k).$$

Отношение интервального недоминирования проектного решения РЭС S_k над проектным решением РЭС S_l будет определяться 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

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

Степень недоминируемости проектного решения РЭС S_k ни одним другим проектным решением РЭС по i -му скалярному интервальному критерию оптимальности будет характеризоваться [9, 10] функцией принадлежности множеству недоминируемых систем $\mu_D^* K_i(S_k)$ в виде

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

Таким образом, значение функции принадлежности $\mu_D^* K_i(S_k)$ показывает степень близости варианта проектного решения по рассматриваемому i -му частному интервальному критерию оптимальности.

Пример выбора оптимального проектного решения радиоэлектронной системы

Радиоэлектронные комплексы относятся к классу сложных технических систем и их проектирование является непростой задачей. На финальных стадиях проектирования часто бывает так, что большое количество задаваемых критериев и проектных параметров имеют отклонения и могут быть представлены в виде диапазонов их возможных изменений. Это может быть диапазон рабочих частот, полоса пропускания, дальность действия, масса, стоимость, габариты и др. Параметры, определяющие надежность, помехоустойчивость, эффективность применения, также могут быть представлены с помощью некоторых субъективных характеристик в интервальной форме.

Рассмотрим пример выбора предпочтительного проектного решения радиоэлектронной системы из трех возможных вариантов, которые характеризуются четырьмя критериями качества, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Критерии оценивания и результаты испытаний образцов РЭС

Частные критерии	Варианты проектного решения РЭС			
	S_1	S_2	S_3	m_i
$K_1(S_\alpha)$ – энергопотребление (Вт/ч)	[550; 650]	[550; 700]	[550; 600]	1000
$K_2(S_\alpha)$ – надежность, наработка на отказ (тыс. ч)	[45; 75]	[70; 80]	[50; 80]	100
$K_3(S_\alpha)$ – дальность действия (обнаружения) (км)	[5; 7]	[4; 6]	[6; 8]	10
$K_4(S_\alpha)$ – масса (кг)	[6; 8]	[7; 9]	[4; 6]	10

Практика показывает, что девиация (отклонение значений) параметров тестируемой РЭС наблюдается в сторону их ухудшения относительно заданных техническим заданием, но на испытаниях расчетные значения контролируемых параметров чаще всего находятся в пределах, определенных проектным заданием, а, значит, оптимальное значение параметра будет находиться в границах интервала его изменений. Эксперты-конструкторы в процессе испытания образцов РЭС могут вместо их некоторой интегральной оценки предложить некоторые диапазоны, в пределах которых находятся все их индивидуальные оценки каждого образца РЭС, что будет гарантировать большую объективность тестирования.

Критерии (контролируемые параметры) представлены в виде интервалов, необходимо выбрать вариант радиоэлектронной системы, удовлетворяющий следующим условиям:

$$K_1(S_\alpha^*) = \min_{\alpha=1,3} [K_1(S_\alpha)], \quad (1)$$

$$K_2(S_\alpha^*) = \max_{\alpha=1,3} [K_2(S_\alpha)], \quad (2)$$

$$K_3(S_\alpha^*) = \max_{\alpha=1,3} [K_3(S_\alpha)], \quad (3)$$

$$K_4(S_\alpha^*) = \min_{\alpha=1,3} [K_4(S_\alpha)]. \quad (4)$$

Таким образом, различные по своей природе критерии имеют и разнородные единицы измерения (Вт/ч, ч, км, кг), разные шкалы измерений m_i и диапазоны отклонения качества. Принятие решения осложняется тем, что критерии не являются аддитивными, и реализация условий (1) и (4) препятствует реализации условий (2) и (3).

Конструкторам при выборе и назначении величин m_i (шкал измерений) надо учитывать не только характер оптимизационной задачи, но и некоторые особенности измерительной информации. Например, в качестве m_i могут использоваться предельно допустимые значения критериев оптимальности некоторой эталонной РЭС, или значения, которые хотелось бы достигнуть в ходе решения оптимизационной задачи, а в оптимизационных задачах контроля параметров РЭС могут быть использованы их предельно допустимые значения.

Результаты вычислений будем заносить в специальную оценочную таблицу и анализировать их, применяя методы теории матриц. Причем при сравнении систем S_k и S_l k -системы будем располагать в строках, а l -системы – располагать в столбцах таблицы.

Используя выражения из источников [1, 2, 4–8], определяем значения $\mu^u K_i(S_k, S_l)$ и $\mu^D K_i(S_k, S_l)$ для каждого частного критерия оптимальности:

$$\mu^u K_1(S_1, S_2) = \frac{[550; 650] - [550; 700]}{1000} = \frac{[-200; 100]}{1000} = [-0,05; 0];$$

$$\mu^D K_1(S_1, S_2) = [-0,05; 0] - [0; -0,05] = -0,05.$$

Аналогично рассчитываем остальные значения и затем заносим в табл. 2.

Таблица 2

Оценочная матрица $\mu^u K_i(S_k, S_l)$ и $\mu^D K_i(S_k, S_l)$

Вариант проектного решения РЭС S_k	Вариант проектного решения РЭС S_l					
	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3
1	2	3	4	5	6	7
	$\ \mu^u K_1(S_k, S_l)\ $			$\mu^D K_1(S_k, S_l)$		
S_1	–	$[-0,05; 0]$	$[0; 0,05]$	–	$-0,05$	$0,05$
S_2	$[0; 0,05]$	–	$[0; 0,1]$	$0,05$	–	$0,1$
S_3	$[-0,05; 0]$	$[-0,1; 0]$	–	$-0,05$	$-0,1$	–

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
$\ \mu^u K_2(S_k, S_l)\ $			$\mu_D^u K_2(S_k, S_l)$			
S_1	–	$[-0,25; -0,05]$	$[-0,05; -0,05]$	–	–0,3	–0,1
S_2	$[0,05; 0,25]$	–	$[0; 0,2]$	0,3	–	0,2
S_3	$[0,05; 0,05]$	$[-0,2; 0]$	–	0,1	–0,2	–
$\ \mu^u K_3(S_k, S_l)\ $			$\mu_D^u K_3(S_k, S_l)$			
S_1	–	$[0,1; 0,1]$	$[-0,1; -0,1]$	–	0,2	–0,2
S_2	$[-0,1; -0,1]$	–	$[-0,2; -0,2]$	–0,2	–	–0,4
S_3	$[0,1; 0,1]$	$[0,2; 0,2]$	–	0,2	0,4	–
$\ \mu^u K_4(S_k, S_l)\ $			$\mu_D^u K_4(S_k, S_l)$			
S_1		$[-0,1; -0,1]$	$[0,2; 0,2]$	–	–0,2	0,4
S_2	$[0,1; 0,1]$	–	$[0,3; 0,3]$	0,2	–	0,6
S_3	$[-0,2; -0,2]$	$[-0,3; -0,3]$	–	–0,4	–0,6	–

После этого, используя выражения из источников [1, 2, 4–8], находим значения $\mu_{ND} K_i(S_k, S_l)$ и $\mu_D^* K_i(S_k)$ и заносим их в табл. 3.

Таблица 3

Оценочная матрица $\mu_{ND} K_i(S_k, S_l)$ и $\mu_D^* K_i(S_k)$

Варианты проектного решения РЭС S_k	Варианты проектного решения РЭС S_l						
	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3	$\mu_D^* K_i(S_k)$
$\mu_{ND} K_2(S_k, S_l)$							
S_1	–	1	1	–	1	1	1
S_2	0,6	–	0,8	0,9	–	0,9	0,9
S_3	0,8	1	–	1	1	–	1
$\mu_D^* K_2(S_k)$	0,6	1	0,8				$\mu_D^* K_4(S_k)$
$\mu_{ND} K_3(S_k, S_l)$							
S_1		0,8	1	–	1	0,6	0,6
S_2	1		1	0,7	–	0,3	0,3
S_3	0,8	0,6		0,6	1	–	0,6
$\mu_D^* K_3(S_k)$	0,8	0,6	1				

Значения $\mu_D^* K_i(S_k)$, которые характеризуют степень близости варианта проектного решения РЭС по рассматриваемому i -му частному критерию оптимальности, выбираем для выполнения условий (1) и (4) – из выделенных (заштрихованных) столбцов таблицы, а для выполнения условий (2) и (3) – из выделенных (заштрихованных) строк и заносим в табл. 4.

Таблица 4

Результирующая матрица оптимального варианта РЭС

Варианты проектного решения РЭС 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

Поскольку $\mu_D^* K_i(S_k)$ определяются в диапазоне $[0;1]$, то выражение $\mu_D^* K_i(S_k)=1$ значит, что проектное решение РЭС S_k будет являться лучшей по i -му скалярному критерию на множестве рассматриваемых проектных решений, а если оно равно 0, то худшей, а значение из интервала $[0; 1]$, характеризует степень приоритета при выборе проектного решения. Чем больше это значение, тем предпочтительнее проектное решение РЭС S_k будет являться лучшим по i -му скалярному критерию оптимальности.

Все частные критерии оптимальности в таблице имеют вид, удобный для сравнения. Анализируя значения $\mu_D^* K_i(S_k)$ и $\mu_D^* K_i(S_l)$, проведем попарное сравнение систем S_k и S_l , исключая неэффективные варианты, и получим в результате требуемый вариант.

Результаты и обсуждение

Таким образом, в соответствии с предлагаемой методикой смысловая содержательность самих критериев не меняется, а вводится понятие их «девиации», искусственного «размывания» на разнородных измерительных шкалах. Предлагаемый подход отличается от методов теории нечетких множеств тем, интервальная функция принадлежности определяется в интервале $[-1;1]$. Это серьезно повышает обоснованность при выборе оптимального проектного решения.

Несмотря на то, что достаточно корректно определяется предпочтительный вариант проектного решения, у такого подхода имеются определенные недостатки:

- 1) отсутствует возможность количественного сравнения соответствующих критериев относительно друг друга;
- 2) отсутствует возможность определения, насколько тестируемый образец РЭС отличается от «идеального» (эталонного);
- 3) диапазон допустимых проектных решений выходных переменных модели оптимизации, вычисленных с помощью интервальных методов, часто оказывается чрезвычайно широким.

Эти проблемы частично устраняются, если применить, например, метод равномерной оптимальности [9, 10], а для последующего уточнения применить, например, байесовский подход к поиску закона распределения. Еще большего эффекта можно достичь, если имеется априорная объективная или эвристическая информация о распределении возможных значений внутри интервала [11, 12]. При этом дополнительно расширяются возможности количественного анализа процессов оптимизации, что позволяет путем попарного сравнения альтернативных вариантов выбрать оптимальный вариант РЭС. Формирование функций принадлежности делает предлагаемый подход субъективным, однако не требует большой выборки статистических данных, что очень облегчает конструкторам принятие решений на финальных этапах проектирования РЭС.

Заключение

Предложенная методика позволяет выбрать предпочтительный вариант проектируемой системы на основе разнородных критериев качества, представленных с различной степенью формализации и интервальной неопределенности. Процесс оптимизации проектного решения РС может быть проведен с использованием векторного критерия оптимальности. Более высокая эффективность предлагаемого метода может быть достигнута путем применения его на этапе тестирования и/или опытной эксплуатации РС, когда проектные параметры часто отклоняются от расчетных и проектировщики рассматривают несколько вариантов конструкций РС, из которых необходимо выбрать оптимальный и доработать его, а также в задачах сравнительного анализа существующих образцов РС. Использование предлагаемой методики позволяет более обоснованно и с небольшими затратами получить решение задачи выбора оптимальной конструкции радиоэлектронных систем по результатам анализа измерительной информации, а также снизить количество повторных этапов проектирования, время и финансовые затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Предлагаемая методика представления и обработки измерительной информации, имеющей различного вида неопределенность, позволяет адекватно отражать разнородную измерительную информацию о качестве тестируемых опытных образцов радиоэлектронных систем и при этом обладает тематической корректностью и приемлемой точностью.

Библиографический список

1. Орловский, С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. – Москва : Наука, 1981. – 203 с.
2. Гилл, Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – Москва : Мир, 1985. – 509 с.
3. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – Москва : Мир, 1976. – 165 с.
4. Шарый, С. П. Конечномерный интервальный анализ / С. П. Шарый. – Новосибирск : XYZ, 2015. – 606 с.
5. Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems / V. A. Ostreikovsky, Ye. N. Shevchenko, N. K. Yurkov, I. I. Kochegarov, A. K. Grishko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 944, iss. 1. – P. 1–10. – DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085.
6. Grishko, A. Reliability Analysis of Complex Systems Based on the Probability Dynamics of Subsystem Failures and Deviation of Parameters / A. Grishko, N. Yurkov, N. Goryachev // *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) : 14th International Conference (Polyana, Svalyava, (Zakarpattya), Ukraine, February 21–25, 2017)*. – Polyana, Svalyava, 2017. – P. 179–182. – DOI 10.1109/CADSM.2017.7916109.
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. Multicriteria Selection of the Optimal Variant of a Complex System Based on the Interval Analysis of Fuzzy Input Data / A. Grishko, E. Danilova, I. Rybakov, E. Lapshin, N. Goryachev // *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT) (Moscow, Russia, March 14–16, 2018)*. – 2018. – P. 1–7. – DOI 10.1109/MWENT.2018.8337237.
9. Grishko, A. Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions / A. Grishko, I. Kochegarov, N. Goryachev // *XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (Saint Petersburg, Russia, 2017)*. – Saint Petersburg, 2017. – P. 210–212. – DOI 10.1109/SCM.2017.7970540.
10. Гришко А. К. Прогнозирование и оптимизация управления процессов проектирования сложных технических систем в масштабе реального времени / А. К. Гришко, А. В. Лысенко, С. А. Моисеев // *Надежность и качество сложных систем*. – 2018. – № 1 (21). – С. 40–45. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-5.
11. Lysenko, A. Optimizing structure of complex technical system by heterogeneous vector criterion in interval form / A. Lysenko, I. Kochegarov, N. Yurkov, A. Grishko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1015, iss. 4. – P. 1–6. – DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
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.

References

1. Orlovskiy S. A. *Problemy prinyatiya resheniy pri nechetkoy iskhodnoy informatsii* [Decision making problems with fuzzy source information]. Moscow: Nauka, 1981, 203 p. [In Russian]
2. Gill F., Myurrey U., Rayt M. *Prakticheskaya optimizatsiya* [Practical optimization]. Moscow: Mir, 1985, 509 p. [In Russian]
3. Zade L. A. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy* [The concept of a linguistic variable and its application to approximate decision making]. Moscow: Mir, 1976, 165 p. [In Russian]
4. Sharyy S. P. *Konechnomernyy interval'nyy analiz* [Finite-dimensional interval analysis]. Novosibirsk: XYZ, 2015, 606 p. [In Russian]
5. Ostreikovsky V. A., Shevchenko Ye. N., Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Grishko A. K. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 944, iss. 1, pp. 1–10. DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085.
6. Grishko A., Yurkov N., Goryachev N. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM): 14th International Conference (Polyana, Svalyava, (Zakarpattya), Ukraine, February 21–25, 2017)*. Polyana, Svalyava, 2017, pp. 179–182. DOI 10.1109/CADSM.2017.7916109.
7. Grishko A. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 2 (18), pp. 26–31. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-4. [In Russian]
8. Grishko A., Danilova E., Rybakov I., Lapshin E., Goryachev N. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT) (Moscow, Russia, March 14–16, 2018)*. 2018, pp. 1–7. DOI 10.1109/MWENT.2018.8337237.

9. Grishko A., Kochegarov I., Goryachev N. *XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (Saint-Petersburg, Russia, 2017)*. Saint-Petersburg, 2017, pp. 210–212. DOI 10.1109/SCM.2017.7970540.
10. Grishko A. K., Lysenko A. V., Moiseev S. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 40–45. DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-5. [In Russian]
11. Lysenko A., Kochegarov I., Yurkov N., Grishko A. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1015, iss. 4, pp. 1–6. DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
12. Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015, vol. 10, no. 23, pp. 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)

Образец цитирования:

Гришко, А. К. Выбор оптимальной конструкции радиоэлектронной системы на основе интервального анализа девиации проектных параметров, представленных в разнородных измерительных шкалах / А. К. Гришко // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2020. – № 1 (31). – С. 11–20. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-2.