

Методика оптимизации проектных решений в условиях многокритериальности и неопределенности

А. К. Гришко¹, Н. К. Юрков², А. В. Лысенко³

Пензенский государственный университет

¹alexey-grishko@rambler.ru, ²yurkov_nk@mail.ru, ³lysenko_av@bk.ru

Аннотация. Рассматривается методика формирования и многокритериального выбора предпочтительного варианта проектного решения на ранних этапах жизненного цикла сложной системы, когда отсутствует достаточное знание параметров и переменных модели оптимизации структуры. Предлагаемая методика учитывает различного вида неопределенность исходной информации, связанной с разнородностью критериев качества проектируемой системы и параметрами, заданными диапазонами их изменений. Оптимизация проектных решений по векторному разнородному критерию качества предполагает вместо коэффициентов, учитывающих важность критериев, применять значения функций принадлежности, показывающие степень близости варианта реализации проектного решения к эффективному или Парето-оптимальному вариантам.

Ключевые слова: оптимизация; критерий качества; функция принадлежности; сложная техническая система

I. ВВЕДЕНИЕ

Сложные технические системы (СТС) имеют, как правило, модульную архитектуру и проектируются на основе применения значительного числа уже разработанных аппаратных и программных средств. Существует большая номенклатура такого оборудования от различных производителей, выполняющего одинаковые функции, необходимые для построения конкретной СТС. Насыщенность рынка отечественной и зарубежной элементной базой, различные условия эксплуатации и специфичные требования по надежности и эффективности применения, а также большое количество типов конструкций усложняет выбор наилучшего варианта СТС для требуемых условий эксплуатации. На практике выбор проектного решения усложняется из-за отсутствия достоверной информации о характеристиках отдельных узлов и модулей. Такая ситуация возникает, например, когда производитель не желает оценивать свою продукцию по предлагаемым показателям качества, а

также скрывает или умышленно искажает реальные характеристики с целью введения в заблуждение своих конкурентов. Конструкторам приходится учитывать такие показатели и характеристики в процессе проектирования СТС в виде некоторых диапазонов их возможных изменений. Для модулей и компонентов СТС, которые находятся в стадии разработки, еще большее количество параметров и показателей качества не имеют четких значений, и уточняются в процессе последующих этапов проектирования. Еще больше затрудняет выбор оптимальной структуры СТС одновременный учет множества критериев качества и их разнородность. Если эти критерии представлены в измерительных шкалах, имеющих разнородный характер, то проектировщикам сложно объективно сравнивать улучшение значения некоторого критерия с ухудшением значения другого критерия. В такой ситуации задачу формирования и оптимизации структуры СТС приходится решать в условиях многокритериальности и неопределенности исходной информации.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для нахождения решений в задачах векторной оптимизации можно использовать теорию нечетких множеств [1, 2] и методы интервального анализа [3–5]. Для решения оптимизационной задачи необходимо построить нечеткие отношения предпочтения интервального вида (НОПИВ), а в качестве критериев использовать функции принадлежности, которые будут являться средством количественной нормализации разнородной информации о качестве проектируемой СТС. На основании [2, 4, 5] введем следующие обозначения: $S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$ – множество возможных альтернативных вариантов структурного построения СТС; $K_i(S_\alpha) = [K_i(S_\alpha); \overline{K_i(S_\alpha)}]$ – частные критерии оптимальности, заданные в интервальном виде, характеризующие каждый отдельный вариант системы S_α , где $K_i(S_\alpha)$ – 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 системы.

Работа выполнена 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.

Требуется найти упорядоченное множество эффективных вариантов структурного построения сложной системы (кортеж Парето) $P = (S_{k_1}^0, S_{k_2}^0, \dots, S_{k_{n_p}}^0)$, ранжируемых по отношению доминирования. Для элементов $S_{k_j}^0$ в зависимости от смысла задачи, выполняются условия: $K_i(S_{k_j}^0) = \min_{\alpha=1, \dots, n} [K_i(S_{k_j}^\alpha)]$, $S_{k_j}^0 \in S^P$ или $K_i(S_{k_j}^0) = \max_{\alpha=1, \dots, n} [K_i(S_{k_j}^\alpha)]$, $S_{k_j}^0 \in S^P$.

A. 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 структуры СТС в виде некоторых связанных областей [1–3] на шкалах, характеризующих возможные допустимые в конкретном случае значения каждого параметра. Исходные данные представляются в виде интервалов [4–5], при этом результаты моделирования также будут интервальными значениями, т. е. содержать интервальную неопределенность. Исходя из перечисленного выше предлагается на основе анализа множества упорядоченных пар S_k и S_l вариантов сложной системы $S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$ по аналогии с нечеткими отношениями предпочтения [5–6] ввести отношение предпочтения интервального вида $R^i K_i(S_k, S_l)$ по i -му частному интервальному критерию оптимальности $K_i(S_\alpha) = [K_i(S_\alpha^-); K_i(S_\alpha^+)]$, $i = \overline{1, r}$, $\alpha = \overline{1, n}$ и определить его интервальной функцией принадлежности $\mu^i K_i(S_k, S_l)$. Функции принадлежности определяем по выражению:

$$\mu^i K_i(S_k, S_l) = \frac{K_i(S_k) - K_i(S_l)}{m_i},$$

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 интервала оценок по i -му частному критерию оптимальности [2, 6–8]. Функция принадлежности также будет иметь интервальный вид: $\mu^i K_i(S_k, S_l) = [\mu^i K_i(S_k, S_l)^-, \mu^i K_i(S_k, S_l)^+]$ и характеризовать каждый вариант системы S_α , где:

$\mu^i K_i(S_k, S_l) \in [-1; 0]$ – значение, характеризующее максимальную степень потерь при признании системы S_k , доминирующей систему S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ;

$\mu^i K_i(S_k, S_l) \in [0; 1]$ – значение, характеризующее максимальную степень выигрыша при признании системы S_k , доминирующей систему S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ;

$\overline{\mu^i K_i(S_k, S_l)} \in [-1; 0]$ означает абсолютное отсутствие доминирования системы S_k над системой S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ;

$\mu^i K_i(S_k, S_l) \in [0; 1]$ – означает абсолютное доминирование системы S_k над системой S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ;

$[\mu^i K_i(S_k, S_l)^-, \mu^i K_i(S_k, S_l)^+] \in [-1; 1]$ – 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 $\mu_D^i K_i(S_k, S_l)$, характеризующей интенсивность доминирования системы S_k над системой S_l по i -му частному интервальному критерию оптимальности в виде:

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

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

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

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

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

B. Пример оптимизации проектного решения структуры радиоэлектронной системы

Радиоэлектронные комплексы относятся к классу сложных технических систем, и их проектирование является непростой задачей. На ранних стадиях проектирования часто бывает так, что большое количество задаваемых критериев, 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.

ТАБЛИЦА I ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Criteria $K_i(S_\alpha)$	System variants			
	S_1	S_2	S_3	m_i
$K_1(S_\alpha)$ – cost (roubles, thousands)	[500;700]	[700;900]	[550;650]	1000
$K_2(S_\alpha)$ – reliability, mean time between failures (hours, thousands)	[40;60]	[70;90]	[60;80]	100
$K_3(S_\alpha)$ – interference immunity (degree)	[5;7]	[4;6]	[6;8]	10
$K_4(S_\alpha)$ – mass (kg)	[5;8]	[7;9]	[3;5]	10

Рассмотрим пример выбора предпочтительного проектного решения радиоэлектронной системы из трех

возможных вариантов, которые характеризуются четырьмя критериями качества, приведенными в табл. 1. Критерии представлены в виде интервалов, необходимо выбрать вариант системы, удовлетворяющий следующим условиям:

$$K_1(S_\alpha^*) = \min_{\alpha=1,3} [K_1(S_\alpha)], K_4(S_\alpha^*) = \min_{\alpha=1,3} [K_4(S_\alpha)], \quad (1)$$

$$K_2(S_\alpha^*) = \max_{\alpha=1,3} [K_2(S_\alpha)], K_3(S_\alpha^*) = \max_{\alpha=1,3} [K_3(S_\alpha)]. \quad (2)$$

Критерии имеют разнородный характер, разные шкалы измерений m_i и диапазоны отклонения качества. Кроме того, реализация условий (1) препятствует реализации (2).

ТАБЛИЦА II ОЦЕНОЧНАЯ МАТРИЦА $\mu^u K_i(S_k, S_l)$ и $\mu_D^u K_i(S_k, S_l)$

System variants S_k	System variants S_l					
	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3
$\ \mu^u K_1(S_k, S_l)\ $				$\mu_D^u K_1(S_k, S_l)$		
S_1	-	[-0.2; 0.1]	[-0.05; 0.05]	-	-0.1	0
S_2	[-0.1; 0.2]	-	[-0.15; 0.25]	0.1	-	0.1
S_3	[-0.05; 0.05]	[-0.25; 0.15]	-	0	-0.1	-
$\ \mu^u K_2(S_k, S_l)\ $				$\mu_D^u K_2(S_k, S_l)$		
S_1	-	[-0.2; 0.2]	[-0.1; -0.1]	-	-0.4	-0.2
S_2	[0.2; 0.2]	-	[0.1; 0.1]	0.4	-	0.2
S_3	[0.1; 0.1]	[-0.1; -0.1]	-	0.2	-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	-	[-0.2; -0.1]	[0.2; 0.2]	-	-0.3	0.4
S_2	[0.1; 0.2]	-	[0.3; 0.4]	0.3	-	0.7
S_3	[-0.2; -0.2]	[-0.4; -0.3]	-	0.4	-0.7	-

ТАБЛИЦА III ОЦЕНОЧНАЯ МАТРИЦА $\mu_{ND} K_1(S_k, S_l)$ и $\mu_D^* K_3(S_k)$

System variants S_k	System variants S_l						
	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3	$\mu_D^* K_1(S_k)$
$\mu_{ND} K_2(S_k, S_l)$							
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				

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

ТАБЛИЦА IV РЕЗУЛЬТИРУЮЩАЯ МАТРИЦА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СИСТЕМЫ.

System variants 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

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.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Отличительной особенностью рассматриваемого подхода от методов теории нечетких множеств [1, 2, 5] является определение интервальной функции принадлежности в интервале $[-1;1]$. Диапазон допустимых решений выходных переменных модели оптимизации, вычисленных с помощью интервальных методов, часто оказывается чрезвычайно широким. Но эта проблема частично устраняется, если имеется априорная объективная или эвристическая информация о распределении возможных значений внутри интервала. При этом дополнительно расширяются возможности количественного анализа процессов оптимизации, что позволяет путем попарного сравнения альтернативных вариантов выбрать оптимальную структуру СТС. Одной из форм представления информации о возможном распределении значений внутри интервала являются нечеткие множества. Формирование функций принадлежности делает такой подход субъективным, однако не требует большой выборки исходных данных, что очень облегчает конструкторам принятие решений на начальных этапах проектирования СТС.

IV. 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 СТС может быть проведен с использованием векторного критерия оптимальности. Более высокая эффективность предлагаемого метода может быть достигнута путем применения его на ранних этапах проектирования сложных технических систем, а также в задачах сравнительного анализа существующих образцов СТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука. 1981. 203 с.
- [2] Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с
- [3] Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: XYZ, 2015. 606 с.
- [4] Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems. International Journal of Applied Engineering Research. Volume 10, Number 23 (2015), pp. 43842–43845
- [5] Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств. М.: Сов.радио, 1975. 368 с
- [6] Grishko A., Kochegarov I., Goryachev N. Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions. 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (Saint Petersburg, Russia, 2017) pp. 210 – 212. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970540.
- [7] Grishko A., Kochegarov I., Yurkov N. Structural and Parameter Optimization of the System of Interconnected Processes of Building Complex Radio-Electronic Devices. 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). (Polyana, Svalyava, (Zakarpattya), Ukraine, 2017) pp. 192–194. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916112.
- [8] Ostreikovskiy V.A., Shevchenko Ye.N., Yurkov N.K., Kochegarov I.I. and Grishko A.K. Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems. Journal of Physics: Conference Series, Volume 944, Number 1, 2018, pp. 1–10. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012085.
- [9] Grishko A. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict. 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, Russia, October 03-06, 2016, Vol. 02, pp. 107–111. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7806423.
- [10] Grishko A., Yurkov N., Goryachev N. Reliability Analysis of Complex Systems Based on the Probability Dynamics of Subsystem Failures and Deviation of Parameters. 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). Polyana, Svalyava, (Zakarpattya), Ukraine, February 21 - 25, 2017, pp. 179–182. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916109.
- [11] Grishko A., Goryachev N., Kochegarov I., Yurkov N. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference. 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Moscow, Russia, May 12-14, 2016. pp. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.