

УДК 629.78

doi: 10.53816/23061456_2025_7–8_8

МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ОБРАЗЦОВ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

METHODOLOGY FOR COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL LEVEL OF SPACE TECHNOLOGY SAMPLES

Канд. техн. наук Д.В. Скворцов, канд. воен. наук С.Н. Краснощеков, канд. техн. наук В.А. Сиволан

Ph.D. D.V. Skvortsov, Ph.D. S.N. Krasnoshchekov, Ph.D. V.A. Sivolan

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В работе предложена методика, опирающаяся на положения теории несуммируемых математических мер теории нечетких множеств, методы собственных векторов, парных сравнений и несуммируемых мер Демпстера и Шефера, позволяющая для рассчитанного комплексного показателя технического уровня образцов космической техники определить обоснованный диапазон удовлетворяющих его значений. Предложенный подход позволяет отказаться от требования равенства единице суммы весовых коэффициентов составляющих комплексного показателя, что снижает влияние на результат субъективных факторов. Представлены результаты апробации методики на примере сравнения космических аппаратов как сложных технических объектов, условно относящихся к одному классу, и особенности ее использования при научно-техническом сопровождении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию перспективных образцов ракетно-космической техники.

Ключевые слова: космический аппарат, уровень технического совершенства, комплексный показатель технического уровня, несуммируемые меры, метод анализа иерархий.

The paper proposes a methodology based on the provisions of the theory of non-summable mathematical measures of fuzzy set theory, the methods of eigenvectors, paired comparisons and non-summable measures of Dempster and Schaefer, which allows for the calculated complex indicator of the technical level of space technology samples to determine a justified range of values satisfying it. The proposed approach allows us to abandon the requirement that the sum of the weighting coefficients of the components of a complex indicator be equal to one, which reduces the influence of subjective factors on the result. The results of testing the methodology are presented using the example of comparing spacecraft as complex technical objects, conditionally belonging to the same class, and the features of its use in scientific and technical support of research and development work on the creation of promising models of rocket and space technology.

Keywords: spacecraft, a level of technical excellence, a comprehensive indicator of the technical level, non-summable measures, hierarchy analysis method.

Введение

Необходимость оценки технического уровня образцов изделий ракетно-космической техники

обусловлена необходимостью обоснования характеристик перспективных изделий, подготовки технического задания на разработку перспективных образцов, стандартов и технических ус-

ловий, а также составления карты технического уровня на изделия.

Под техническим уровнем понимается относительная характеристика качества продукции, основанная на сопоставлении значений показателей, характеризующих техническое совершенство оцениваемой продукции, с соответствующими базовыми значениями.

В свою очередь, уровень технического совершенства — это относительная характеристика, отражающая сравнительную степень технического совершенства рассматриваемого космического аппарата по отношению к базовому (аналогу или совокупности аналогов) [1].

Сравнительной оценке технического уровня образцов космической техники посвящен ряд научных и методических работ [2–5]. При этом показателем уровня технического совершенства является численное выражение, определяющееся отношением показателя технического совершенства рассматриваемого технического объекта (ТО) к аналогичному показателю технического совершенства базового (эталонного) ТО [4, 5].

Все до сих пор известные методы определения комплексного показателя технического уровня в конечном счете сводятся к поиску весовых коэффициентов [2–5, 7, 8], сумма которых равна единице. Это требование не учитывает того факта, что значения показателя, полученные в результате применения различных подходов, являются зависимыми величинами. В предлагаемой методике для снижения уровня такой зависимости требование равенства суммы весов единице снимается.

Цель работы — рассмотрение методики, позволяющей получить не только рассчитанный комплексный показатель технического уровня, но и обоснованный диапазон его значений.

Методика определения диапазона комплексного показателя технического уровня образцов техники

Сам методический аппарат, на котором основывается предлагаемая методика, опирается на теорию нечетких множеств [9–12], метод парных сравнений [3], метод анализа иерархий Т. Саати [7, 8], теорию несуммируемых мер Демпстера — Шефера [6] и метод собственных векторов [7].

Пусть рассматривается задача определения наиболее предпочтительного альтернативного проекта y^* из представленных y_j , $j = 1, \dots, m$.

Задаем n критериев оценки $(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Каждому критерию лицо, принимающее решение, приписывает веса $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$. При этом проект y^* можно представить следующим образом:

$$y^* = \left\{ y_j \mid \max_j \sum_{i=1}^n w_i \cdot f_j(x_i) \right\},$$

где $f_j(x_i)$ — значение i -го критерия оценки j -го проекта.

Проблема состоит в определении весов $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$. Одним из методов нахождения их значений является метод собственных векторов, предложенный Т. Саати в рамках метода анализа иерархий (МАИ).

Вектор $\mathbf{W}$ считается мерой возможности в пространстве X . В классическом МАИ веса w_i вектора $\mathbf{W}$ нормализуются так, чтобы их сумма была равна 1.

В предлагаемом подходе выполнение условия

$$\sum_i w_i = 1$$

необязательно.

Условия, которым должны удовлетворять значения элементов w_i вектора $\mathbf{W}$, состоят в следующем: $0 \leq w_i \leq 1$, $i = 1, \dots, n$ и существует, по крайней мере, одно i , для которого $w_i = 1$.

После того как определен набор критериев оценки технического уровня объекта, лицу, принимающему решение, задается вопрос: «Насколько важен критерий оценки c по сравнению с критерием оценки d ?»

Для установления относительной важности элементов иерархии используется шкала отношений Чеддока (табл. 1), правомочность использования которой доказана в [7]. Данная шкала позволяет преобразовать предпочтения одного сравниваемого критерия перед другим в числовые значения a_{cd} в интервале от 1 до 9 или обратные им значения.

Заполнение матрицы сравнения осуществляется по следующему правилу. Если критерий оценки c превосходит критерий оценки d , то значению элемента матрицы a_{cd} присваивается значение шкалы Чеддока, а значению симметричного

Таблица 1

Шкала Чеддока

Одинаково важны	1
Почти важен	3
Достаточно важен	5
Очень важен	7
Крайне важен	9
Используются как промежуточные значения	2, 4, 6, 8

элемента a_{dc} матрицы присваивается обратное к нему число. Если критерии оценки равноценны, то элементам (a_{cd}, a_{dc}) матрицы присваиваются единицы.

В результате формируется положительная обратнo-симметричная матрица парных сравнений

$$\mathbf{M} = [a_{ij} | a_{ii} = 1, a_{ij} = 1 / a_{ji}] \mathbf{M}_{nn}(\mathbf{F}).$$

Ранжирование объектов осуществляется на основании главных собственных векторов.

Проблема заключается в нахождении максимального собственного значения $\lambda_{\max}$ матрицы $\mathbf{M}$ и собственного вектора $\mathbf{W}$, соответствующего $\lambda_{\max}$, из следующего векторного уравнения первого порядка:

$$(\mathbf{M} - \lambda \mathbf{I}) \mathbf{W} = 0,$$

где λ — собственное значение матрицы $\mathbf{M}$;

$\mathbf{I}$ — единичная матрица.

В предлагаемой методике используются мера возможности и мера необходимости, представляющие собой несуммируемые меры в теории нечетких множеств [6].

Использование несуммируемых весов позволяет смягчить требование независимости параметров оценки по сравнению со случаем суммируемых весов, а также сгладить явление нарушения порядка, вызванное добавлением сходных критериев оценки.

В соответствии с теорией несуммируемых математических мер теории нечетких множеств [6] в методике применяются несуммируемые меры. Для вещественной функции f в $\mathbf{X}$ определяются функция верхнего распределения F^* и функция нижнего распределения F_* , путем интегрирования которых определяются верхнее E^* и нижнее E_* ожидаемые значения искомой величины:

$$E^*(f) = \int_{-\infty}^{\infty} v dF_*(v) = \sum_{A \subset X} m(A) \cdot \max_{x \in A} f(x);$$

$$E_*(f) = \int_{-\infty}^{\infty} v dF^*(v) = \sum_{A \subset X} m(A) \cdot \min_{x \in A} f(x),$$

где A — фокусирующие множества;

m — базовые вероятности.

Для верхнего E^* и нижнего E_* ожидаемых значений искомой величины справедливо неравенство

$$\min f(x) \leq E_*(f) \leq E(f) \leq E^*(f) \leq \max f(x),$$

которое можно интерпретировать как сужение диапазона искомой величины.

Если вектор $\{\mathbf{w}_i\}$ — степень важности i -го критерия, полученный при решении

$$(\mathbf{M} - \lambda \mathbf{I}) \mathbf{W} = 0,$$

соответствует максимальному собственному значению $\lambda_{\max}$ матрицы $\mathbf{M}$, то выбирая q значений $(r_1 < r_2 < \dots < r_q = 1)$, можно определить q фокусирующих множеств

$$\mathbf{A}_l = \{x_i | w_i \geq r_l\}, l = (1, \dots, q)$$

и q базовых вероятностей

$$m(\mathbf{A}_l) = (r_l - r_{l-1} | l = 1, \dots, q, r_0 = 0).$$

Определив базовые вероятности $m(\mathbf{A}_l)$, можно вычислить верхнее E^* и нижнее E_* ожидаемые значения искомого диапазона:

$$E^*(f) = \sum_{l=1}^q (r_l - r_{l-1}) \cdot \max_{x \in A_l} f(x);$$

$$E_*(f) = \sum_{l=1}^q (r_l - r_{l-1}) \cdot \min_{x \in A_l} f(x).$$

Таким образом, для рассчитанного комплексного показателя технического уровня ТО предложенная методика позволяет определить диапазон удовлетворяющих его значений.

Основные шаги предлагаемой методики.

1. Строится словесная матрица попарного сравнения результатов, полученных различными методами оценки.

2. Словесная матрица приводится к числовой положительной обратно-симметричной, которая проверяется на непротиворечивость посредством индекса и отношения согласованности.

3. Производится поиск максимального собственного значения матрицы и соответствующего ему вектора весов.

4. Определяются фокусирующие множества и соответствующие им базовые вероятности.

5. Рассчитываются нижнее и верхнее ожидаемые значения искомого диапазона.

6. При необходимости рассчитывается рекомендуемое значение комплексного показателя технического уровня ТО.

7. Определяется место ТО в иерархии сравнений.

Предложенная методика реализована на языке Python и включена в состав программно-моделирующего комплекса [13].

Апробация методики проведена на исходных данных (табл. 2) и матрице парных сравнений ТТХ (табл. 3) отечественных и зарубежных КА [4], условно относящихся к одному классу (выполняющих одинаковую целевую задачу).

Результаты расчетов приведены в табл. 4 и на графиках (рисунок). В таблице и на графиках

представлены значения комплексного показателя (ESum) технического уровня сравниваемых ТО, верхняя (E_{max}) и нижняя (E_{min}) границы диапазона, а также место каждого образца в иерархии сравнений.

Рассматривая полученные результаты, можно отметить следующее:

– по разработанной методике удалось предложить достаточно узкий диапазон комплексного показателя технического уровня ТО;

– результаты, полученные методом собственных векторов [7], лежат внутри рассчитанного диапазона;

– рекомендуемые значения комплексного показателя технического уровня ТО могут быть рассчитаны по методу «центра тяжести» [9, 11];

– в связи с тем, что в алгоритме определения ESum принято условие независимости исходных данных, довольно часто наблюдается смещение итоговой величины от «центра тяжести» диапазона.

Выводы

– Предложена методика решения задачи определения диапазона комплексного показателя технического уровня ТО, которая опирается

Таблица 2

Исходные данные

Номер ТТХ	Номер КА								Влияние
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	7000,0	6570,0	6000,0	16500,0	2100,0	2800,0	800,0	2000,0	1,0
2	5,0	3,0	5,0	10,0	7,0	7,50	10,0	1,0	–1,0
3	0,50	1,0	0,90	0,23	0,35	0,31	1,50	0,30	1,0
4	1,0	1,0	1,0	0,35	0,70	0,75	0,50	0,30	–1,0
5	20,0	28,0	38,0	3,0	15,0	16,40	10,0	15,0	–1,0
6	2,0	2,0	3,0	2,0	2,0	2,0	3,0	1,0	–1,0

Таблица 3

Матрица парных сравнений ТТХ КА

Номер ТТХ КА	1	2	3	4	5	6
1	1	1	0,14	0,33	1	0,2
2	1	1	0,2	0,5	1	0,2
3	7	5	1	3	3	1
4	3	2	0,33	1	1	0,33
5	1	1	0,33	1	1	0,33
6	5	5	1	3	3	1

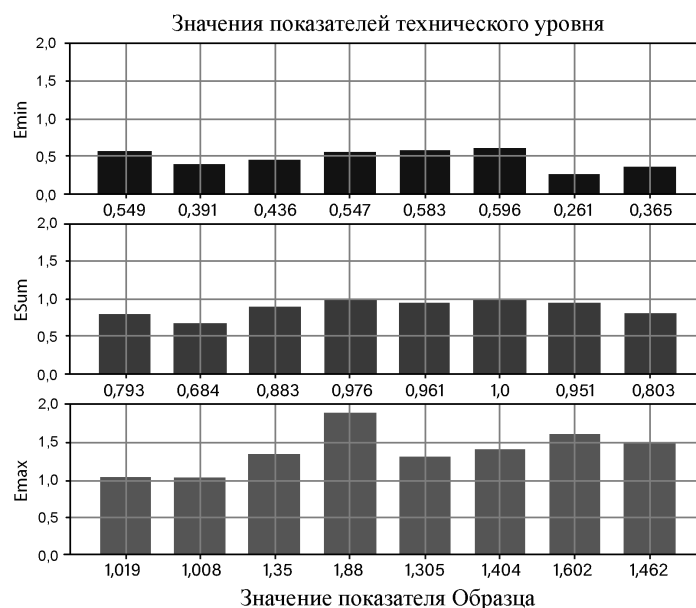


Рис. Показатель технического уровня и значения границ диапазона

Таблица 4

Результаты апробации методики

Номер КА	Суммарная оценка (E_{Sum})		Альтернативная оценка (E_{max})		Дополнительная оценка (E_{min})	
	Оценка	Место	Оценка	Место	Оценка	Место
1	0,793	7	1,019	7	0,549	3
2	0,684	8	1,008	8	0,391	6
3	0,883	5	1,35	5	0,436	5
4	0,976	2	1,88	1	0,547	4
5	0,961	3	1,305	6	0,583	2
6	1	1	1,404	4	0,596	1
7	0,951	4	1,602	2	0,261	8
8	0,803	6	1,462	3	0,365	7

на алгоритмы теории нечетких множеств [9–12], методы собственных векторов, парных сравнений [3], агрегированной иерархии Т. Саати [7, 8] и несуммируемых мер Демпстера и Шефера [6]. Такой подход позволил отказаться от требования равенства единице суммы весовых коэффициентов, что в свою очередь смягчило влияние субъективных факторов;

– методика реализована на языке Python и включена в состав исследовательского ПМК [13] в виде расчетного блока оценивания уровня технического совершенства изделий ракетно-космической техники;

– разработанный расчетный блок в составе программно-моделирующего комплекса может

быть использован научно-исследовательскими организациями при научно-техническом сопровождении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию перспективных образцов ракетно-космической техники, а также в учебном процессе при курсовом и дипломном проектировании.

Список источников

- ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1979. 21 с.
- Орлов А.И. Экспертные оценки: учеб. пособие. М., 2002. 31 с.

3. Дэвид Г. Метод парных сравнений. М.: Статистика, 1978. 144 с.

4. Скворцов Д.В., Рошин Г.Б. Методика оценки технического уровня отечественных образцов космических аппаратов и их зарубежных аналогов // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». Т. 1. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. С. 480–485.

5. Методика оценки уровня технического совершенства отечественных образцов ВВСТ и их зарубежных аналогов. М.: 27 НИИ МО РФ, 2010. 36 с.

6. Асаи К., Иваи Д. и др. Прикладные нечеткие системы. М.: Мир, 1993. 368 с.

7. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1989. 316 с.

8. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.

9. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.

10. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.

11. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2011. 798 с.

12. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия. 2007. 284 с.

13. Денисов А.М., Краснощеков С.Н., Скворцов Д.В. и др. Структура алгоритмического обеспечения ПМК оценивания достижимых ТТХ перспективных КА // Сборник научных статей III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». Т. 2. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. С. 111–115.

References

1. GOST 15467–79. Product quality management. Basic concepts. Terms and definitions. Moscow: Publishing House of Standards, 1979. 21 p.

2. Orlov A.I. Expert assessments: a textbook. Moscow, 2002. 71 p.

3. David G. The Method of Paired Comparisons. Moscow: Statistika, 1978. 144 p.

4. Skvortsov D.V., Roschin G.B. A method of assessment of the technical level of domestic spacecrafts and their foreign counterparts // Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference «Modern problems of creation and exploitation of weapons, military and special equipment». St. Petersburg. Vol. 1. Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, 2012. Pp. 480–485.

5. Methodology for assessing the level of technical excellence of domestic VVST samples and their foreign analogues. Moscow: 27 Scientific Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2010. 36 p.

6. Asai K., Iwai D. et al. Applied fuzzy systems. Moscow: Mir Publ., 1993. 368 p.

7. Saaty T. Decision Making: The Analytic Hierarchy Process. Moscow: Radio and Communications, 1989. 316 p.

8. Saaty T., Kerns K. Analytical planning. Organization of systems. Moscow: Radio and Communications, 1991. 224 p.

9. Zade L. The concept of a linguistic variable and its application to approximate decision making. Moscow: Mir Publ., 1976. 165 p.

10. Kofman A. Introduction to the theory of fuzzy sets. Moscow: Radio and Communications, 1982. 432 p.

11. Pegat A. Fuzzy modeling and control. Moscow: BINOM. Laboratory of knowledge, 2011. 798 p.

12. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. Fuzzy models and networks. Moscow: Hotline, 2007. 284 p.

13. Denisov A.M., Krasnoshchekov S.N., Skvortsov D.V. et al. The structure of algorithmic support for PMK assessment of achievable performance characteristics of promising spacecraft // Collection of scientific articles of the III All-Russian scientific and practical conference «Modern problems of the creation and operation of weapons, military and special equipment». Vol. 2. St. Petersburg: Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. 2016. Pp. 111–115.