

Научная статья
УДК 519.71

Подход к определению обобщенных критериев шкалирования военных технологий на основе аппроксимационного метода

Сергей Владимирович Стукалин, Дмитрий Геннадьевич Хованов,
Георгий Юрьевич Першиков

Аннотация. Предложен подход к выбору наилучшей из некоторой совокупности однотипных технологий на основе аппроксимационного метода, который позволяет шкалировать технологии по оси обобщенного критерия и сравнивать их между собой с учетом значений характеристик, которыми технологии описываются. Основным достоинством предлагаемого подхода является возможность решения задачи аналитическим методом без привлечения экспертов или минимальной дополнительной информации, получаемой от них.

Ключевые слова: шкалирование; обобщенный критерий; аппроксимационный метод; военные технологии

Для цитирования: Стукалин С.В., Хованов Д.Г., Першиков Г.Ю. Подход к определению обобщенных критериев шкалирования военных технологий на основе аппроксимационного метода // Вооружение и экономика. 2024. №3(69). С. 39-46.

Original article

Approach to the Determination of the Military Technologies Generalized Scaling Criteria on the Basis of the Approximation Method

Sergei V. Stukalin, Dmitrii G. Khovanov, Georgii Iu. Pershikov

Abstract. An approach to selection of one of the best from a certain set of similar technologies is proposed. This approach is based on the approximation method, which allows to scale technologies along the axis of the generalized criterion and intercompare them with regard for the technology specifics. The main advantage of the proposed approach is the ability to solve the problem by means of analytical method without experts support or minimal additional information received from experts.

Keywords: scaling; generalized criterion; approximation method; military technologies

For citation: Stukalin S.V., Khovanov D.G., Pershikov G.Iu. Approach to the Determination of the Military Technologies Generalized Scaling Criteria on the Basis of the Approximation Method. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2024;69(3): 39-46. (In Russ.).

В условиях беспрецедентного санкционного давления со стороны западных стран и разрыва многих кооперационных цепочек в нашей стране проводится системная работа по импортозамещению технологий, используемых для создания вооружения, военной и специальной техники. С учетом ограниченности выделяемых на эти цели ассигнований актуальной является задача сравнения технологий для выбора первоочередных направлений финансирования в рамках отдельного технологического направления.

В зависимости от набора рассматриваемых для каждой технологии показателей, предназначенных для вынесения оценочных суждений и являющихся критериями оценки [1], данная задача сводится к построению агрегированного показателя, называемого обобщенным критерием и сопоставляющего каждой технологии оценку ее «качества» (свертка критериев). Такой обобщенный критерий позволяет перевести задачу в одномерную плоскость и «шкалировать» технологии, определяя лучшие.

Традиционно для решения подобных задач используются многокритериальные методы экспертного оценивания, ключевым недостатком которых является формирование репрезентативной группы специалистов и обработка полученных частных оценок (часто кардинально отличающихся друг от друга) [2-4].

Для формирования обобщенного критерия авторами используется метод линейной свертки (1) в виде $z = z(x)$, где $x \in X$ – пространство критериев:

$$z_i = \sum_{j=1}^n a_j x_{ij}, \quad (1)$$

где x_{ij} – значение j -го частного критерия i -й технологии; a_j – вес j -го частного критерия, отражающий степень его важности относительно других частных критериев.

В зависимости от имеющихся исходных данных могут использоваться аддитивная, мультипликативная и другие виды свертки [5].

Таким образом, задача оценки технологий с линейным видом обобщенного критерия сводится к определению вектора весов a_j . Для этого могут использоваться три группы методов: непосредственного вычисления весов, экспертного определения весов и аппроксимационные. Предлагаемый автором подход основан на использовании аппроксимационного метода, позволяющего определить веса критериев по результатам анализа «внутреннего» критериального пространства без необходимости участия экспертной группы (лица, принимающего решение) или с минимальной дополнительной информацией, получаемой от них.

Ниже приведена вербальная постановка задачи построения обобщенного критерия оценки технологий. Пусть $E = \{e_r, r = \overline{1, m}\}$ – множество технологий. Для E задана матрица $X = \|x_{rj}\|_{m,n}$ значений n критериев. Информация о попарных соотношениях между технологиями отражена в матрице $Q = \|q_{rk}\|_{m,m}$, где $k = \overline{1, m}$. Обобщенный критерий имеет линейный вид и порождает аппроксимирующую матрицу $D = \|d_{rk}\|_{m,m}$. Задача состоит в поиске вектора a , обеспечивающего максимальную близость матриц Q и D , т.е. минимизирующего меру близости $J(Q, D)$.

Алгоритм нахождения обобщенного критерия приведен на рисунке 1 и включает 5 основных шагов, подробно изложенных ниже.

На первом шаге осуществляется нормировка значений частных критериев. При этом сами критерии могут быть двух видов:

- «больше-лучше», чем лучше технология, тем большее значение принимает критерий. Его нормировка осуществляется по формуле (2):

$$x_{rj}^H = \frac{(x_{rj} - \min(x_j))}{(\max(x_j) - \min(x_j))}, \quad (2)$$

где x_{rj}^H – нормализованное значение j -го критерия для r -й технологии;

x_{rj} – значение j -го критерия для r -й технологии;

$\min(x_j)$ – минимальное значение j -го критерия;

$\max(x_j)$ – максимальное значение j -го критерия.

- «меньше-лучше», чем лучше технология, тем меньшее значение принимает критерий. Его нормировка осуществляется по формуле (3):

$$x_{rj}^H = \frac{(\max(x_j) - x_{rj})}{(\max(x_j) - \min(x_j))}. \quad (3)$$

На втором шаге формируется матрица $Q = \|q_{rk}\|_{m,m}$, характеризующая парное отношение предпочтительности технологий. Для этого находится матрица $U = \|u_{rk}\|_{m,m}$, полученная путем введения Евклидовой метрики по формуле:

$$u_{rk} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{rj} - x_{kj})^2}. \quad (4)$$

Далее привлекается дополнительная информация (матрица бинарных отношений $P = \|p_{rk}\|_{m,m}$), источниками которой могут служить:

- результаты обработки экспертного опроса (при этом необязательно, чтобы были даны попарные оценки всех технологий);

- результаты моделирования;

- ретроспективный анализ и т.д.

Причем, в случае проведения экспертного опроса, результаты могут быть представлены в любом виде, включая:

- ранжирование;

- оценки технологий;

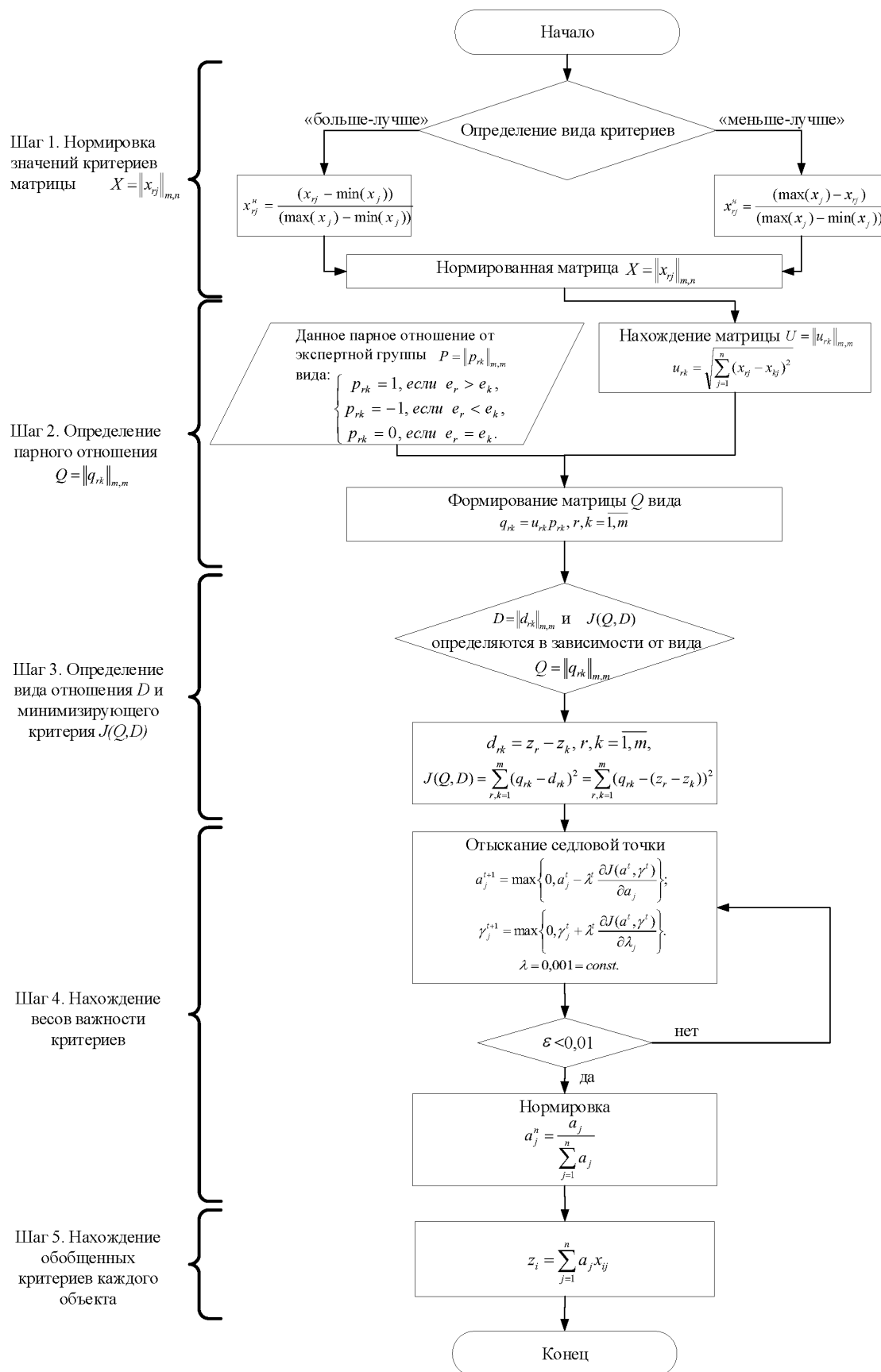


Рисунок 1 – Алгоритм нахождения обобщенного критерия

- попарное сравнение технологий, которые могут быть далее преобразованы в матрицу $P = \|p_{rk}\|_{m,m}$ вида:

$$\begin{cases} p_{rk} = 1, & \text{если } e_r > e_k, \\ p_{rk} = -1, & \text{если } e_r < e_k, \\ p_{rk} = 0, & \text{если } e_r = e_k. \end{cases} \quad (5)$$

Затем на основе матриц $U = \|u_{rk}\|_{m,m}$ и $P = \|p_{rk}\|_{m,m}$ определяется отношение $Q = \|q_{rk}\|_{m,m}$ вида:

$$q_{rk} = u_{rk}p_{rk}, \quad r, k = \overline{1, m}, \quad (6)$$

показывающее насколько более предпочтительной является технология e_r относительно технологии e_k .

На третьем шаге определяется вид отношения D и минимизирующего критерия $J(Q, D)$. Для матрицы Q задача построения обобщенного критерия может ставиться в зависимости от типа шкалы, в которой измерена величина q_{rk} . С учетом того, что величина q_{rk} измерена в шкале разностей, аппроксимирующее отношение D (7) и вид минимизирующего критерия (8) определяются через значения $Z = \{z_r, r = \overline{1, m}\}$ шкалы обобщенного критерия [6]:

$$d_{rk} = z_r - z_k, \quad r, k = \overline{1, m}, \quad (7)$$

$$J(Q, D) = \sum_{r,k=1}^m (q_{rk} - d_{rk})^2 = \sum_{r,k=1}^m (q_{rk} - (z_r - z_k))^2. \quad (8)$$

Ввиду того, что используется линейная шкала, критерий близости можно записать как $J(a)$. Минимум критерия определяется, приравнявая к нулю производные по неизвестным весам важности частных критериев $a_1, a_2, \dots, a_\mu, \mu = \overline{1, n}$. Для задачи (8) это приводит к системе линейных уравнений [7]:

$$\frac{\partial J(a)}{\partial a_\mu} = 2 \left[\sum_{r,k=1}^m q_{rk} (x_{r\mu} - x_{r\mu}) + 2 \sum_{j=1}^n a_j \sum_{r=1}^m x_{rj} (mx_{r\mu} - \sum_{k=1}^m x_{k\mu}) \right] = 0. \quad (9)$$

На четвертом шаге определяются веса важности критериев a_j . С учетом того, что построение линейного обобщенного критерия имеет смысл при ограничениях типа $a_j \geq 0, j = \overline{1, n}$, задача (8) решается при помощи метода неопределенных множителей Лагранжа [6], который заключается во введении функции типа:

$$J(a, \gamma) = J(a) + \sum_{j=1}^n \gamma_j a_j \quad (10)$$

и определения ее седловой точки (a^*, γ^*) согласно теореме Куна-Таккера [8] с учетом требований:

$$\frac{\partial J(a^*, \gamma^*)}{\partial a_\mu} \leq 0, \quad \mu = \overline{1, n}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial J(a^*, \gamma^*)}{\partial \gamma_\eta} \geq 0, \quad \eta = \overline{1, n}, \quad (12)$$

где γ – неопределенные множители функции Лагранжа.

Условия (11, 12) являются необходимыми и достаточными условиями оптимальности точки a^* . Для решения задачи отыскания седловой точки используется градиентный метод Эрроу-Гурвица, состоящий из двух последовательных приближений согласно уравнениям [8]:

$$a_j^{t+1} = \max \left\{ 0, a_j^t - \lambda^t \frac{\partial J(a^t, \gamma^t)}{\partial a_j} \right\}; \quad (13)$$

$$\gamma_j^{t+1} = \max \left\{ 0, \gamma_j^t + \lambda^t \frac{\partial J(a^t, \gamma^t)}{\partial \lambda_j} \right\}. \quad (14)$$

На основе (10) подпроцедура (14) имеет вид:

$$\gamma_j^{t+1} = \max\{0, \gamma_j^t + \lambda^t a_j^t\}, \tag{15}$$

где λ – некоторое число, называемое шагом вычислений и заключенное между нулем и единицей ($0 \leq \lambda \leq 1$).

В качестве исходного допустимого решения задачи принимаются произвольные значения a_j^t и γ_j^t . Тогда критерием оценки качества получаемого решения являются неравенства $|a_j^{t+1} - a_j^t| \leq \varepsilon$ и $|\gamma_j^{t+1} - \gamma_j^t| \leq \varepsilon$, где $\varepsilon < 0,01$.

Величина $\frac{\partial J(a^t, \gamma^t)}{\partial a_j} = \frac{\partial J(a^t)}{\partial a_j} - \gamma_j^t$ определяется на основе выражения (9).

После получения значений с учетом требования $a_j \geq 0, j = \overline{1, n}$ неотрицательности весов возникает необходимость наложения ограничений на масштаб изменения значений обобщенного критерия, а именно:

$$\sum_{j=1}^n a_j = 1. \tag{16}$$

Вследствие чего полученные результаты нормируются следующим образом:

$$a_j^n = \frac{a_j}{\sum_{j=1}^n a_j}. \tag{17}$$

На пятом шаге, в соответствии с (1), определяются значения обобщенных критериев, что дает возможность линейного шкалирования рассматриваемых военных технологий.

В качестве примера рассмотрена гипотетическая задача сравнения предложений по созданию гибких термоэлектрических генераторов (ТЭГ), характеристики которых представлены в таблице 1.

В качестве частных критериев будут рассматриваться: минимальное число термоэлектрических пар, минимальный перепад температур, напряжение, удельная мощность.

На первом шаге, в соответствии с (2) и (3), осуществляется нормировка значений характеристик. Критерии «минимальный перепад температур» и «число пар» являются критериями вида «меньше-лучше», остальные «больше-лучше», в соответствии с этим отнормированные значения приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Характеристики рассматриваемых термоэлектрических генераторов

№ п/п	Материал	Минимальное число термоэлектрических пар	Минимальный перепад температур, °С	Напряжение, мВ	Удельная мощность, Вт
1	Bi _{0.4} Sb _{1.6} Te ₃ и Bi ₂ Te _{2.7} Se _{0.3}	7	30	83,3	0,21×10 ⁻⁶
2	Bi ₂ Te ₃	8	19	7	2,1×10 ⁻⁶
3	Bi ₂ Te ₃ и Sb ₂ Te ₃	4	20	24	48×10 ⁻⁹
4	Bi ₂ Te ₃	20	7	2,1	15×10 ⁻⁹
5	BiTe/SbTe	8	20	36,4	40,3×10 ⁻⁹
6	Bi _{0.5} Sb _{1.5} Te ₃ и Bi ₂ Te _{2.7} Se _{0.3}	12	15	14,2	224×10 ⁻⁹
7	Al, ZnO, и Zn-Sb	10	180	460	2,5×10 ⁻⁸

Таблица 2 – Нормированные характеристики ТЭГ

№ п/п	Минимальное число термоэлектрических пар	Перепад температур	Напряжение	Удельная мощность
1	0,813	0,867	0,177	0,094
2	0,750	0,931	0,011	1,000
3	1,000	0,925	0,048	0,016
4	0,000	1,000	0,000	0,000
5	0,750	0,925	0,075	0,012
6	0,500	0,954	0,026	0,100
7	0,625	0,000	1,000	0,005

На втором шаге определяется внутреннее парное отношение в виде матрицы Q . Для этого находится матрица $U = \|u_{rk}\|_{m,m}$ по формуле (4):

$$U = \begin{pmatrix} 0 & 0,926 & 0,248 & 0,847 & 0,156 & 0,358 & 1,213 \\ 0,926 & 0 & 1,016 & 1,252 & 0,990 & 0,934 & 1,688 \\ 0,248 & 1,016 & 0 & 1,004 & 0,251 & 0,508 & 1,379 \\ 0,847 & 1,252 & 1,004 & 0 & 0,758 & 0,513 & 1,546 \\ 0,156 & 0,990 & 0,251 & 0,758 & 0 & 0,271 & 1,314 \\ 0,358 & 0,934 & 0,508 & 0,513 & 0,271 & 0 & 1,372 \\ 1,213 & 1,688 & 1,379 & 1,546 & 1,314 & 1,372 & 0 \end{pmatrix}.$$

Далее привлекается дополнительная информация $P = \|p_{rk}\|_{m,m}$ (рассмотрен случай результатов обработки экспертного опроса), где эксперты указали следующее бинарное отношение технологий по правилу (5):

$$P = \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Затем на основе матриц $U = \|u_{rk}\|_{m,m}$ и $P = \|p_{rk}\|_{m,m}$ определяется отношение $Q = \|q_{rk}\|_{m,m}$ вида (6):

$$Q = \begin{pmatrix} 0,000 & -0,926 & -0,248 & 0,847 & -0,156 & 0,358 & 0,000 \\ 0,926 & 0,000 & 1,016 & -1,252 & 0,990 & -0,934 & 1,688 \\ 0,248 & -1,016 & 0,000 & -1,004 & 0,000 & 0,508 & 1,379 \\ -0,847 & 1,252 & 1,004 & 0,000 & 0,758 & 0,513 & 1,546 \\ 0,156 & -0,990 & 0,000 & -0,758 & 0,000 & 0,271 & -1,314 \\ -0,358 & 0,934 & -0,508 & -0,513 & -0,271 & 0,000 & -1,372 \\ 0,000 & -1,688 & -1,379 & -1,546 & 1,314 & 1,372 & 0,000 \end{pmatrix}.$$

На третьем шаге определяются вид отношений D и $J(Q, D)$. Так как матрица Q измерена в шкале разностей, то отношение D будет соответствовать виду (7), а минимизирующее отношение $J(Q, D)$ – виду (9).

На четвертом шаге определяются веса важности критериев с применением функции Лагранжа и градиентного метода Эрроу-Гурвица при помощи итерационных процессов (13), (15).

При этом используется $\lambda = 0,001 = const$. В качестве исходного допустимого решения задачи принимается $a_j^t = 0,1, \gamma_j^t = 0,1, \varepsilon < 0,01$.

Значения весов критериев a_j для каждой итерации приведены в таблице 3.

На пятой итерации можно наблюдать, что все значения ε приняли значение менее 0,01, таким образом, весовые коэффициенты $a_1 = 0,187$; $a_2 = 0,283$; $a_3 = 0,220$; $a_4 = 0,245$ являются удовлетворяющими по точности решению задачи отыскания седловой точки. Далее производится нормировка весовых коэффициентов по формуле (17):

$$a_1 = 0,200; a_2 = 0,302; a_3 = 0,235; a_4 = 0,269.$$

На пятом шаге, в соответствии с (1), определяются обобщенные критерии сравнения ТЭГ, позволяющие сформировать шкалу предпочтений объектов исследования (таблица 4), где 1 – лучший, 7 – худший.

Таким образом, в статье предложен подход к выбору наилучшей из некоторой совокупности однотипных технологий на основе аппроксимационного подхода, позволяющего шкалировать технологии по оси обобщенного критерия и сравнивать их между собой с учетом значений характеристик, которыми технологии описываются. Основным достоинством предлагаемого подхода является возможность решения задачи аналитическим методом без привлечения экспертов или минимальной дополнительной информации, получаемой от них в качественных и количественных оценках, включая результаты проведенных ранее экспертиз.

Подход может быть использован при формировании комплексов работ Программы развития базовых военных технологий, подпрограммы 6 Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период, а также отборе технологий двойного назначения, имеющих перспективу применения в оборонной сфере, для проведения военно-технических экспериментов.

Таблица 3 – Значения весов критериев в зависимости от итерации

	a_1	a_2	a_3	a_4	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
Исходные данные	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
1 итерация	0,236	0,258	0,243	0,249	0,250	0,250	0,250	0,250
ε	-0,236	-0,258	-0,243	-0,249				
2 итерация	0,221	0,265	0,236	0,248	0,250	0,249	0,250	0,250
ε	0,014	-0,008	0,007	0,001				
3 итерация	0,208	0,273	0,229	0,247	0,249	0,249	0,249	0,249
ε	0,014	-0,007	0,007	0,001				
4 итерация	0,194	0,279	0,223	0,245	0,249	0,249	0,249	0,249
ε	0,014	-0,007	0,006	0,001				
5 итерация	0,187	0,283	0,220	0,245	0,249	0,249	0,249	0,249
ε	0,007	-0,003	0,003	0,000				

Таблица 4 – Шкала предпочтений технологий в зависимости от обобщенного критерия

№ п/п	Материал	Обобщенный критерий	Место в шкале предпочтений
1	$\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$	0,4912	3
2	Bi_2Te_3	0,6961	1
3	Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3	0,4954	2
4	Bi_2Te_3	0,3024	7
5	BiTe/SbTe	0,4508	4
6	$\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$	0,4211	5
7	Al, легированный ZnO, и Zn-Sb	0,3901	6

Дальнейшими направлениями развития предложенного подхода являются:

- учет неоднородностей сравниваемых технологий (в случае сравнения технологий из смежных областей или при недостатке значений характеристик технологий);
- учет характеристик технологий, измеренных в качественных шкалах;
- возможность комбинированного подхода с эвристическими методами сравнительной оценки альтернатив.

Список источников

1. Ларичев О.И. Наука и искусство принятия решений. М.: Наука, 1979. 200 с.
2. Майданчик Б.И. Сравнительный экономический анализ в машиностроении. М. Машиностроение, 1973. 240 с.
3. Пронин А.Ю., Лясковский В.Л. К вопросу формирования экспертных групп и оценке компетентности специалистов, привлекаемых для научно-технических экспертиз // Научный вестник ОПК России. 2023. №3. С. 76-82.
4. Лясковский В.Л., Смирнов С.С., Пронин А.Ю. Методика оценки компетентности экспертов в процессе формирования предложений в проекты программных документов // Вооружение и экономика. 2013. №3(24). С. 54-59.
5. Методы военно-научных исследований систем вооружения / Под общ. ред. В.М. Буренка. М.: Граница, 2017. 511 с.
6. Авен П.О., Мучник И.Б., Ослон А.А. Функциональное шкалирование. М.: Наука, 1988. 182 с.
7. Литвак Б.Г. Экспертная информация: методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. 184 с.
8. Браверман Э.М. Математические модели планирования и управления в экономических системах. М.: Наука, 1976. 368 с.

Информация об авторах

- С.В. Стукалин – кандидат технических наук, доцент, SPIN код автора 6402-8084.
Д.Г. Хованов – кандидат технических наук.
Г.Ю. Першиков – SPIN код автора 4783-8860.