

## МОДЕЛИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЕСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**Титенко Е. А.** – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник центра перспективных исследований и разработок, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия.

**Фролов С. Н.** – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник центра перспективных исследований и разработок, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия.

**Ханис А. Л.** – канд. воен. наук, доцент кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия.

**Добросердов О. Г.** – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, советник при ректорате, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия.

**Захаренков А. И.** – д-р техн. наук, профессор, первый заместитель генерального директора, АО «Воентелеком», г. Москва, Россия.

**Попов А. Н.** – генеральный директор, АО «Авиаавтоматика» им. В. В. Тарасова», г. Курск, Россия.

**Дронова Т. А.** – д-р мед. наук, профессор кафедры пропедевтики внутренних болезней, ФГБОУ ВО «Курский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Курск, Россия.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Актуальность работы связана с многокритериальным сравнением инновационных объектов, под которыми понимаются объекты с частично совпадающими индивидуальными показателями, имеющие неопределенные, субъективные значения и критерии их оценки. Сравнимые инновационные объекты описываются общими и индивидуальными показателями, причем количество индивидуальных показателей является значительным (более 50%). Метод анализа иерархий является наиболее подходящим математическим аппаратом для сравнения инновационных объектов, так как он совмещает наглядность описания предметной области, численную результативность, естественный учет вариативности исходных парных оценок. Тем не менее, данный метод слабо учитывает индивидуальные показатели инновационных объектов при составлении матриц парных сравнений, что не позволяет получить итоговые веса, соответствующие индивидуальным особенностям инновационных объектов.

**Цель.** Разработка модифицированного метода анализа иерархий, обеспечивающего ранжирование инновационных объектов с частично совпадающими индивидуальными показателями.

**Метод.** В работе разработан модифицированный метод анализа иерархий, включающий типовую последовательность этапов от построения иерархии предметной области и формирования критериев оценки инновационных объектов до этапа вычисления итоговых весов инновационных объектов, отличающийся во-первых, введением на этапе построения иерархии предметной области матрицы весов общих и индивидуальных показателей по системам объектов, во-вторых расчётом поправочных коэффициентов на основе локальной или глобальной моделей коррекции весов показателей систем объектов на этапе составления сводной таблицы весов, в-третьих вычислением итоговых весов инновационных объектов с учётом поправочных коэффициентов, что позволило учесть индивидуальные особенности сравниваемых инновационных объектов.

**Результаты.** В работе рассмотрены инновационные объекты с общими и индивидуальными показателями в пропорции 1:2 с количеством критериев сравнения, равным 5, что соответствует классу объектов средней организационной сложности. Сравнимые объекты содержат типовой объект (количество индивидуальных показателей существенно меньше 50%), явно инновационный объект (количество индивидуальных показателей больше 50%), объект в пограничной зоне (количество индивидуальных показателей около 50%). Классический метод не чувствителен к индивидуальным особенностям инновационных объектов, что определило минимальный вес для явно инновационного объекта. Модифицированный метод, напротив, определил минимальный вес для объекта в пограничной зоне, так как он имеет одновременно пониженные значения в матрице парных сравнений по критериям и низкие значения индивидуальных показателей.

**Выводы.** Разработанный модифицированный метод анализа иерархий и модели коррекции в его составе объективно отражают порядок ранжирования объектов с учетом их описания в виде матрицы общих и индивидуальных показателей. Согласно моделированию, ценным для практики принятия решений следует считать долю индивидуальных показателей в их общем количестве более 55 %. В этом случае объекты предпочтительнее оценивать на основе модифицированного метода анализа иерархий. Полученный на основе модели коррекции весов вектор поправочных коэффициентов имеет самостоятельное значение при решении различных расчетно-аналитических задач и прикладных задач принятия решений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** инновационный высокотехнологичный объект, модель коррекции весов, расширенная сводная таблица, вектор поправочных коэффициентов, метод анализа иерархий.

### АББРЕВИАТУРЫ

MA – среднеарифметическое значение;

MGM – среднегеометрическое значение;

MHR – среднегармоническое значение;

БЛА – беспилотные летательные аппараты;

МАИ – метод анализа иерархий;

МПС – матрицы парных сравнений.

### НОМЕНКЛАТУРА

A – матрица;

$Arg(i)$  – целевая функция выбора объектов;  
 $C$  – управляющая система;  
 $d$  – среднее количество индивидуальных показателей на систему в составе объекта;  
 $E$  – энергетическая система;  
 $z$  – количество критериев сравнения;  
 $K_x$  –  $x$ -й критерий сравнения объекта  $x=1-z$ ;  
 $K_1$  – критерий надежности;  
 $K_2$  – критерий ремонтпригодности;  
 $K_3$  – критерий комплектации;  
 $K_4$  – критерий стоимости;  
 $K_5$  – критерий летательных качеств;  
 $L$  – связанная система;  
 $m$  – количество сравниваемых объектов (альтернатив);  
 $N$  – навигационная система;  
 $O_{ij}$  – вес  $i$ -го объекта по  $j$ -му критерию ( $i=1-m$ ,  $j=1-q$ );  
 $P$  – общее количество индивидуальных показателей;  
 $p$  – количество индивидуальных показателей системы;  
 $p_i^*$  – подмножество индивидуальных показателей;  
 $q$  – количество систем;  
 $S$  – общее количество общих показателей;  
 $s$  – количество общих показателей системы;  
 $s_i^*$  – подмножество общих показателей;  
 $T$  – движительная система;  
 $VCC_{MA}$  – вектор поправочных коэффициентов на основе среднеарифметического;  
 $VCC_{MGM}$  – вектор поправочных коэффициентов на основе среднегеометрического;  
 $vs_{ij}$  – вес  $ij$ -го общего показателя;  
 $vp_{ij}$  – вес общего показателя  $i$ -го объекта для  $j$ -й системы;  
 $vs_{ij}'$  – скорректированный вес общего  $ij$ -го показателя;  
 $w_i$  –  $i$ -й элемент вектора весов ( $i=1-q$ );  
 $\theta$  – функция вычисления веса  $i$ -го объекта;  
 $\varphi$  – сборочная функция.

## ВВЕДЕНИЕ

Задачи анализа и многокритериального выбора альтернатив для инновационных объектов связаны с обработкой неопределенной, неточной, субъективной информации о характеристиках объектов и критериях оценки. Типовые примеры таких задач:

- сравнение сложных технических комплексов, технологий/методик производства наукоемкой продукции;
- выбор типа подвижного робота, беспилотного летательного аппарата;
- оценка инновационных проектов;
- поиск перспективной научно-технической продукции;
- оценка рисков производства высокотехнологичной продукции и др.

Традиционно сравнение и оценка объектов в рамках теории принятия решений [1, 2] основаны на:

© Титенко Е. А., Фролов С. Н., Ханис А. Л., Добросердов О. Г., Захаренков А. И., Попов А. Н., Дронова Т. А., 2020  
DOI 10.15588/1607-3274-2020-3-17

- сложившихся весовых отношениях между показателями;
- общезначимых для предметной области критериях сравнения;
- объективных, точных оценках сравниваемых альтернатив;
- унификации множества показателей, описывающих объекты сравнения.

К настоящему времени разработано множество моделей и методов решения задачи многокритериального выбора – математические методы сверток, модели интегральных показателей, модели нечетких оценок, методы структурного моделирования, иерархического описания [3–12] и др. Наибольший интерес представляют такие модели и методы, которые дают возможность учитывать многокритериальность, неопределенность исходных данных, субъективизм промежуточных оценок. Наиболее остро данные ограничения проявляются при сравнении инновационных объектов (альтернатив), так как они характеризуются субъективными значениями показателей (новый/известный, выгодный/убыточный, привлекательный/традиционный, автономный/зависимый и др.).

Классический МАИ, предложенный Т. Л. Саати [13, 14], и его многочисленные модификации наиболее полно подходят для сравнения и выбора инновационных объектов [15–20]. МАИ совмещает наглядность описания предметной области, численную результативность, естественный учет вариативности исходных данных.

Как известно, главная идея данного метода состоит в парном сопоставлении критериев, построении МПС и их обработке с целью составления сводной матрицы весов объектов по всем критериям, вычисления по ней итоговых весов объектов и выбора лучшей альтернативы. Достаточно полная классификация модификаций МАИ представлена в работах Мироновой Н. А. [16, 17]. В них систематизированы модификации МАИ, применимые для различных типов данных, шкал измерений, типа иерархии, вида системы предпочтения экспертов, метода формирования МПС, применяемых правил свертки и др.

Тем не менее, МАИ при сравнении инновационных объектов слабо учитывает их индивидуальные показатели, что не всегда позволяет получить объективные парные оценки альтернатив или полностью заполнить все МПС [21, 22]. Эта ситуация составляет основное противоречие исследования.

В связи с этим в работе предлагается подход к уточнению МПС с учетом структурно-функциональной организации инновационных объектов. Сравнимые инновационные объекты по своим составным частям (системам) описываются общими и индивидуальными показателями, причем количество индивидуальных показателей является значительным (более 50%). Данная особенность наиболее характерна для высокотехнологичных инновационных объектов: робототехнические комплексы, БЛА, малые космические аппараты, коммуникационные ИТ-

устройства, материалы с метеорологическими меняющимися свойствами, экзоскелеты, станки с изменяемой операционной частью, двигатели-гибриды и др.

**Объектом** исследований является сравнительный анализ инновационных высокотехнологичных технических объектов, таких как БЛА, малые космические аппараты, наземные робототехнические комплексы, обладающих иерархичной структурой, слабой унификацией.

**Предметом** исследований является модифицированный МАИ, использующий модели вычисления весов инновационных объектов по наборам общих и индивидуальных показателей и позволяющий осуществить выбор лучшей альтернативы при субъективных оценках экспертов.

**Целью** работы является разработка модифицированного МАИ, обеспечивающего ранжирование инновационных технических объектов с частично совпадающими индивидуальными показателями.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе в качестве примера инновационных технических объектов рассматриваются БЛА. Они характеризуются большим набором разнородных показателей частично присутствующих в различных экземплярах БЛА [23–26].

Пусть для повышения обоснованности принимаемых решений БЛА [23–25] декомпозируется на  $q$  систем ( $q = 5$ ) –  $T, C, N, E, L$ . Каждая из этих систем описывается множествами общих и индивидуальных показателей  $S$  и  $P$  соответственно. Тогда вычисление приоритетов (весов) по  $m$  сравниваемым объектам (альтернативам)  $O_1 \dots O_m$  и выбор лучшей альтернативы осуществляется на основе целевой функции вида

$$\begin{aligned} & Arg(i) | \theta(O_i, K_1 \dots K_z, T(s_i, p_i), C(s_i, p_i), \\ & N(s_i, p_i), E(s_i, p_i), L(s_i, p_i)) \rightarrow \max. \end{aligned} \quad (1)$$

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Метод анализа иерархий разработан в 1970 году американским ученым Томасом Л. Саати. В настоящее время он активно развивается и широко используется в практической деятельности для решения самых разнообразных задач. Метод позволяет лицу, принимающему решение, структурировать сложную проблему в виде иерархии и выполнить количественную оценку имеющихся вариантов решения (альтернатив). Результаты практического применения данной методологии приведены во многих российских и зарубежных изданиях, в частности, существуют издания, целиком посвященные развитию МАИ [13–20].

Метод анализа иерархий постоянно расширялся и модифицировался. Изменения были направлены на повышение обоснованности принимаемых решений, повышение точности решения в задаче вычисления собственного вектора матрицы, уменьшение вычислительной сложности проверочных шагов, введение

нелинейных решающих функций на заключительных этапах метода [15–22]. Тем не менее, этапы формирования и проверки матриц парных сравнений в части уточнения значений этих матриц рассматривались без привязки к структурно-функциональной организации инновационных объектов. Узким местом метода является несогласованность оценок экспертов при сравнении инновационных объектов в силу наличия нефакторов у объектов [21], неоднозначности ранжирования критериев [22] при итоговой свертке. Это обстоятельство делало метод существенно зависящим от мнения и квалификации эксперта, т.е. вносило значительный субъективизм на этапе ввода исходных данных – МПС [16–18, 20].

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Как известно [4, 9], классический МАИ состоит из последовательности этапов:

- 1) построение иерархии предметной области и формирование критериев оценки объектов;
- 2) составление матрицы парных сравнений критериев;
- 3) получение вектора приоритетов критериев;
- 4) оценка степени согласованности матрицы парных сравнений критериев;
- 5) составление матриц парных сравнений сравниваемых объектов по каждому критерию;
- 6) получение векторов приоритетов объектов по каждому критерию;
- 7) оценка степени согласованности всех МПС;
- 8) составление сводной матрицы весов объектов по всем критериям;
- 9) вычисление глобального вектора приоритетов объектов и выбор лучшей альтернативы.

Применительно к инновационным объектам особенность первого этапа МАИ заключается в том, что такие объекты декомпозируются на  $q$  систем, которые в дальнейшем описываются матрицами общих и индивидуальных показателей. Сравнение объектов осуществляется по  $K$  критериям. При этом справедливо, что

$$s \in T, s \in C, s \in L, s \in E, s \in N, \quad (2)$$

$$\forall(i) (s_i \neq 0), i=1-q. \quad (3)$$

Для индивидуальных показателей в соответствии с  $p = p_1 \cup p_2 \cup p_3 \cup p_4 \cup p_5$  будет справедливо, что

$$p_1 \in T, p_2 \in C, p_3 \in L, p_4 \in E, p_5 \in N, \quad (4)$$

$$\exists(i) | (p_i=0), i=1-q. \quad (5)$$

Эта особенность не позволяет напрямую использовать МАИ и его многочисленные модификации, так как каждый объект имеет многомерное описание, что затрудняет заполнение матриц парных сравнений [23–26].

Для снятия данного ограничения в рамках первого этапа МАИ предлагается формализовать наборы общих и индивидуальных показателей. Формализация сводится к созданию локальной и глобальной моделей коррекции общих показателей по сравниваемым объектам и формированию матрицы скорректированных весов.

В дальнейшем на этапе составления сводной матрицы весов объектов полученная скорректированная матрица весов является основой для вычисления вектора поправочных коэффициентов по сравниваемым объектам. Этот вектор как дополнительный сомножитель используется при вычислении итоговых весов в сводной таблице.

Таким образом, модификация МАИ включает расширение первого и предпоследнего этапов для получения и обработки общих и индивидуальных показателей по сравниваемым инновационным объектам, что позволяет учесть их индивидуальные особенности.

В работе используется количественный подход к оценке вклада показателей систем в оценку БЛА (инновационного технического объекта), а именно:

- чем больше количество показателей системы, тем больший вклад соответствующая система вносит в оценку объекта;

- чем больше количество индивидуальных показателей системы, тем больше должен быть вес показателя этой системы.

Вклад каждого из показателей систем в оценку БЛА оценивается локальным весом показателя в шкале [0–1]. Значение веса системы определяется операцией коррекции весов показателей от  $q$  систем со стороны значений индивидуальных показателей, смещающих в большую сторону вес общего показателя в пределах каждой системы.

Согласно количественному подходу подмножеству общих показателей  $s_i$ , принадлежащих  $i$ -му объекту ( $i=1-m$ ), соотносится с количеством  $s$ , а подмножество индивидуальных показателей  $p_i$ , принадлежащих  $i$ -му объекту ( $i=1-m$ ), соотносится со средним количеством индивидуальных показателей на систему  $d$ . При этом особенность учета вклада индивидуальных показателей определяется тем, что индивидуальный показатель отдельной системы в составе объекта предлагается дополнительно соотносить с количеством всех индивидуальных показателей для этой системы по  $m$  объектам к максимально возможному количеству индивидуальных показателей по  $m$  объектам. Эта особенность позволяет учитывать разброс количества индивидуальных показателей по сравниваемым объектам.

Значения весов общих и индивидуальных показателей по  $j$ -й системе ( $j=1-q$ ) определяются как

$$\forall j | (vs_{ij} = s_{ij}^* / s), j=1-q, \quad (6)$$

$$\forall j | (vp_{ij} = (p_{ij}^* / d) \cdot (\sum_{i=1}^m p_{ij}^* / m \cdot d)), j=1. \quad (7)$$

Формируемая матрица весов общих и индивидуальных показателей (табл. 1) представляет собой дополнительную информацию о сравниваемых объектах  $O_1 - O_m$ , которую нужно ввести в МАИ в виде поправочных коэффициентов.

Таблица 1 – Матрица весов общих и индивидуальных показателей объектов по  $q$  системам

Objects	1		2		...	q	
	s	p <sub>1</sub>	s	p <sub>2</sub>		s	p <sub>m</sub>
O <sub>1</sub>	vs <sub>11</sub>	vp <sub>11</sub>	vs <sub>12</sub>	vp <sub>12</sub>	...	vs <sub>1q</sub>	vp <sub>1q</sub>
O <sub>2</sub>	vs <sub>21</sub>	vp <sub>21</sub>	vs <sub>22</sub>	vp <sub>22</sub>	...	vs <sub>2q</sub>	vp <sub>2q</sub>
...	...	...	...	...	...	...	...
O <sub>m</sub>	vs <sub>m1</sub>	vp <sub>m1</sub>	vs <sub>m2</sub>	vp <sub>m2</sub>	...	vs <sub>m<sub>q</sub></sub>	vp <sub>m<sub>q</sub></sub>

Для учета влияния индивидуальных показателей систем используются локальная или глобальная стимулирующие модели, смещающие вес общих показателей в большую сторону.

Локальная стимулирующая модель основана на персональном изменении веса общего показателя в пределах соответствующей системы [26]. Данная модель имеет вид:

$$vs'_{ij} = vs_{ij} (1 + vp_{ij}). \quad (8)$$

Свертка в итоговое значение всех индивидуальных показателей ( $p_{11}, p_{12}, \dots, p_{mq}$ ) является сущностью глобальной стимулирующей модели вклада показателей систем инновационного объекта. Выделяются две разновидности глобальной стимулирующей модели:

- глобальная модель, основанная на равноправном вкладе всех индивидуальных показателей в итоговую оценку объекта;

- глобальная модель, основанная на учете индивидуальных показателей в пределах одного объекта сравнения.

В первом случае коррекция веса общего показателя вычисляется как:

$$vs'_{ij} = vs_{ij} (1 + \varphi(vp_{11}, \dots, vp_{ij}, \dots, vp_{mq})). \quad (9)$$

Во втором случае коррекция веса общего показателя вычисляется в пределах  $i$ -го объекта по  $q$  системам, т. е. в модели для каждой строки таблицы 1 учитываются веса  $vp_{i1}, vp_{i2}, \dots, vp_{iq}$ :

$$vs'_{ij} = vs_{ij} (1 + \varphi(vp_{i1}, vp_{i2}, \dots, vp_{iq})). \quad (10)$$

По второму варианту коррекция веса общего  $ij$ -го показателя  $i$ -го объекта осуществляется без учета влияния систем остальных объектов, что позволяет автономно изменять веса общих показателей по каждому объекту сравнения.

Далее в работе для коррекции весов общих показателей использованы локальная модель (вычисления по (8)) и глобальная модель второго типа (вычисления по (10)). На основе математических моделей (8) и (10) формируется таблица скорректированных весов общих показателей (табл. 2).

В качестве функции свертки в (10), в общем случае, целесообразно использовать средние показатели: среднеарифметическое значение (MA), среднегеометрическое значение (MGM), среднегармоническое значение (MHR) и др.

Таблица 2 – Матрица скорректированных весов общих показателей

Objects	1		2		...	q	
	s	p <sub>1</sub>	s	p <sub>2</sub>		s	p <sub>m</sub>
O <sub>1</sub>	vs <sub>11</sub>		vs <sub>12</sub>		...	vs <sub>1q</sub>	
O <sub>2</sub>	vs <sub>21</sub>		vs <sub>22</sub>		...	vs <sub>2q</sub>	
O <sub>3</sub>	vs <sub>31</sub>		vs <sub>32</sub>		...	vs <sub>3q</sub>	
...					...		
O <sub>m</sub>	vs <sub>m1</sub>		vs <sub>m2</sub>		...	vs <sub>mq</sub>	

Согласно [27] для различных правил вычисления среднего справедливо правило мажорантности:

$$MA \leq MGM \leq MHR.$$

Табл. 3 содержит типовые формулы вычисления средних весов показателей.

На основе таблицы скорректированных весов (табл. 2) вычисляется вектор поправочных коэффициентов для объектов O<sub>1</sub> – O<sub>m</sub> (как MA/MGM и др.) – VCC<sub>MA</sub> = (vcc<sub>ma1</sub> ... vcc<sub>ma<sub>m</sub></sub>) или

$$VCC_{MGM} = (vcc_{mgm1} \dots vcc_{mgm_m}).$$

Для повышения обоснованности принимаемых решений полученный вектор VCC<sub>MA</sub> или VCC<sub>MGM</sub> вводится на этапе составления сводной таблицы (предпоследний этап классического МАИ).

Таблица 3 – Основные формулы средних весов показателей

Name	Formula
MA	$y = \frac{1}{mq} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^q v_{p_{ij}}^*$
MGM	$y = mq \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^q v_{p_{ij}}^*}$
MHR	$y = mq \frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^q \frac{1}{v_{p_{ij}}^*}}$

Для этого на основе весов критериев (w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, ... w<sub>q</sub>)<sup>T</sup>, весов сравниваемых объектов O<sub>ij</sub> (i=1–m, j=1–q) и вектора VCC<sub>MA</sub> или VCC<sub>MGM</sub> вычисляется итоговый вес объекта, определяется по одной из формул:

$$V_j = \sum_{i=1}^{i=q} O_{ij} \cdot w_i \cdot vcc_{mgm_j}, \quad (11)$$

$$V_j = \sum_{i=1}^{i=q} O_{ij} \cdot w_i \cdot vcc_{ma_j}. \quad (12)$$

Таким образом, итоговые веса сравниваемых инновационных объектов по критериям K<sub>1</sub>–K<sub>z</sub> вычисляются как произведение не двух, а трех множителей, что определяет модификацию МАИ на этапе вычисления итоговых весов инновационных объектов с учетом их индивидуальных особенностей.

#### 4 РЕЗУЛЬТАТЫ

Как показано выше, сравниваемые инновационные объекты (на примере БЛА) имеют следующие количественные характеристики [23, 26]: m=3; q=5; s=6; d=3.

Пусть значения общих и индивидуальных показателей (s, p) объектов O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> представлены в табл. 4.

Согласно табл. 4 имеется S=66 общих показателей и P=37 индивидуальных показателей. При этом 21 индивидуальный показатель (57%) описывает объект O<sub>3</sub>, что определяет его как высоко инновационный среди сравниваемых объектов.

Таблица 4 – Матрица показателей систем для сравниваемых объектов

Object	T		C		L		E		N		Всего
	s	p <sub>1</sub>	s	p <sub>2</sub>	s	p <sub>3</sub>	s	p <sub>4</sub>	s	p <sub>5</sub>	
O <sub>1</sub>	4	1	3	1	6	2	5	2	4	1	7
O <sub>2</sub>	4	2	4	2	3	2	6	1	4	2	9
O <sub>3</sub>	5	5	5	3	4	5	4	4	5	4	21
Σ		8		6		9		7		7	37

В табл. 5 на основе (6) и (7) получена матрица весов общих и индивидуальных показателей объектов. В табл. 6 на основе (8) получена матрица скорректированных весов общих показателей.

Таблица 5 – Матрица весов показателей для сравниваемых объектов

Objects	Весы системы T		Весы системы C		Весы системы L		Весы системы E		Весы системы N	
	s	p <sub>1</sub>	s	p <sub>2</sub>	s	p <sub>3</sub>	s	p <sub>4</sub>	s	p <sub>5</sub>
O <sub>1</sub>	0,677	0,107	0,500	0,08	1,0	0,240	0,833	0,187	0,667	0,093
O <sub>2</sub>	0,667	0,213	0,667	0,16	0,500	0,240	1,000	0,093	0,667	0,187
O <sub>3</sub>	0,883	0,533	0,883	0,240	0,667	0,600	0,667	0,373	0,833	0,373

Таблица 6 – Матрица скорректированных весов общих показателей на основе локальной модели

Objects	Весы системы T		Весы системы C		Весы системы L		Весы системы E		Весы системы N	
	s	p <sub>1</sub>	s	p <sub>2</sub>	s	p <sub>3</sub>	s	p <sub>4</sub>	s	p <sub>5</sub>
O <sub>1</sub>	0,738		0,540		1,240		0,989		0,729	
O <sub>2</sub>	0,809		0,773		0,620		1,093		0,791	
O <sub>3</sub>	1,278		1,033		1,067		0,916		1,144	

На основе индивидуальных весов систем T, C, L, E, N из табл. 5 по формулам вычисления средних, приведенных в табл. 3, рассчитаны средние значения весов индивидуальных показателей (табл. 7). Эти значения необходимы для последующего вычисления вектора поправочных коэффициентов.

Таблица 7 – Средние веса индивидуальных показателей

Object	Весы индивидуальных показателей					V <sub>ma</sub>	V <sub>mgm</sub>	V <sub>mgr</sub>
	vp1	vp2	vp3	vp4	vp5			
O <sub>1</sub>	0,107	0,08	0,240	0,187	0,093	0,141	0,129	0,119
O <sub>2</sub>	0,213	0,16	0,240	0,093	0,187	0,179	0,170	0,160
O <sub>3</sub>	0,533	0,240	0,600	0,373	0,373	0,424	0,403	0,382

Согласно правила мажорантности из трех средних для глобальной модели коррекции весов выбирается VCC<sub>MGM</sub> для расчетов по (10) и вычисляются скорректированные веса общих показателей (табл. 8).

По матрицам скорректированных весов общих показателей на основе локальной и глобальной моделей (табл. 6 и табл. 8) как средние арифметическое и геометрическое по каждому объекту O<sub>1</sub>–O<sub>3</sub> вычисляются VCC<sub>MA</sub> и VCC<sub>MGM</sub> соответственно (табл. 9).

Данные вектора представляют собой формализованную дополнительную информацию, которая далее будет введена в сводную таблицу (предпоследний этап МАИ) при расчете итоговых весов по выражениям (11) или (12).

Пусть для МАИ рассматриваемые технические объекты O<sub>1</sub>–O<sub>3</sub> оцениваются по следующим критериям: K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, K<sub>4</sub>, K<sub>5</sub> [23–26].

Для данных объектов задана матрица парных сравнений критериев A(5×5) в следующем виде [26] (табл. 10).

Таблица 8 – Матрица скорректированных весов общих показателей на основе глобальной модели

Objects	Весы системы T		Весы системы C		Весы системы L		Весы системы E		Весы системы N	
	s	p <sub>1</sub>	s	p <sub>2</sub>	s	p <sub>3</sub>	s	p <sub>4</sub>	s	p <sub>5</sub>
O <sub>1</sub>	0,753		0,565		1,129		0,940		0,753	
O <sub>2</sub>	0,780		0,780		0,585		1,170		0,780	
O <sub>3</sub>	1,239		1,239		0,936		0,936		1,169	

Таблица 9 – Вектора поправочных коэффициентов

Objects	VCC <sub>MA</sub>	VCC <sub>MGM</sub>
O <sub>1</sub>	0,813	0,806
O <sub>2</sub>	0,804	0,799
O <sub>3</sub>	1,081	1,095

Вектор весов критериев  $\bar{w} = (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_m)^T$  рассматривается как MGM сравниваемых критериев.

Таблица 10 – Матрица парных сравнений критериев

Критерии	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	Вектор весов критериев w
K <sub>1</sub>	1	2	3	5	6	0,44
K <sub>2</sub>	0,50	1	2	3	4	0,26
K <sub>3</sub>	0,33	0,5	1	2	3	0,16
K <sub>4</sub>	0,2	0,33	0,5	1	2	0,09
K <sub>5</sub>	0,16	0,25	0,33	0,5	1	0,06

Проверка индекса согласованности для табл. 10 показала, что исходную матрицу парных сравнений критериев A можно считать согласованной и использовать в дальнейших расчетах [13, 26].

Пусть получены по каждому критерию K<sub>x</sub> (x=1–5) значения весов объектов-альтернатив (табл. 11). На основе данных из табл. 10 и табл. 11 вычислены итоговые веса объектов (табл. 12) как сумма произведений двух множителей: веса критерия K<sub>x</sub> (x=1–5) и веса объекта O<sub>1</sub>–O<sub>3</sub>.

Таблица 11 – Весы объектов по критериям сравнения

Objects	Критерии				
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>
O <sub>1</sub>	0,74	0,72	0,64	0,07	0,74
O <sub>2</sub>	0,17	0,17	0,26	0,28	0,17
O <sub>3</sub>	0,09	0,11	0,10	0,65	0,09

Таблица 12 – Итоговые веса объектов

Objects	Критерии					Итоговый вес
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	
O <sub>1</sub>	0,32	0,18	0,10	0,01	0,04	0,66
O <sub>2</sub>	0,07	0,04	0,04	0,03	0,01	0,19
O <sub>3</sub>	0,04	0,03	0,02	0,06	0,005	0,15

Таким образом, рассчитанная по стандартному МАИ упорядоченная последовательность летательных аппаратов имеет вид  $O_1 \rightarrow O_2 \rightarrow O_3$ .

В данных расчетах (табл. 12) не учитываются индивидуальные особенности инновационных объектов, т.е. вектор поправочных коэффициентов из табл. 9.

Таблица 13 является расширением стандартного МАИ. Она содержит сводную матрицу расчета итоговых весов объектов с учетом вектора поправочных коэффициентов на основе МА.

Таблица 13 – Сводная матрица весов объектов с учетом вектора поправочных коэффициентов

Objects	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$VCC_{MA}$	Итоговый вес
	0,44	0,26	0,16	0,09	0,06		
$O_1$	0,74	0,72	0,64	0,07	0,74	0,813	0,55
$O_2$	0,17	0,17	0,26	0,28	0,17	0,804	0,15
$O_3$	0,09	0,11	0,10	0,65	0,09	1,081	0,16

По модифицированному МАИ получена измененная упорядоченная последовательность  $O_1 \rightarrow O_3 \rightarrow O_2$ . Она более точно отражает места в ранжировании объектов-альтернатив, так как учитывает индивидуальные показатели сравниваемых объектов.

Таким образом, объект, имеющий большее количество индивидуальных показателей, имеет более высокий итоговый вес.

Для проверки влияния количества индивидуальных показателей объектов было выполнено моделирование расчета выбранного  $VCC_{MA}$  в зависимости от количества индивидуальных показателей для фиксированного количества общих показателей  $S=66$ .

Пропорция распределения индивидуальных показателей по системам  $N_T, N_C, N_L, N_E, N_N$  имеет вид:

$$\begin{aligned}
 N_T &= \{(1,2,2), (1,1,3), (1,2,3), (1,2,5), (2,2,5), (3,2,5)\}; \\
 N_C &= \{(0,0,3), (0,1,3), (1,1,3), (1,2,3), (2,3,5), (2,3,5)\}; \\
 N_L &= \{(1,0,2), (1,1,4), (1,2,4), (2,2,5), (3,2,5), (3,2,5)\}; \\
 N_E &= \{(0,1,2), (1,1,3), (2,1,3), (2,1,4), (2,2,5), (2,2,5)\}; \\
 N_N &= \{(0,1,3), (0,2,3), (1,2,3), (1,2,4), (2,3,4), (2,3,5)\}.
 \end{aligned}$$

На основе общих показателей, имеющих распределение согласно табл. 4, и матрицы значений по системам  $N_T, N_C, N_L, N_E, N_N$  было сформировано 6 таблиц, по которым выполнены расчеты векторов поправочных коэффициентов. В частности, четвертый столбец индивидуальных показателей по системам  $N_T, N_C, N_L, N_E, N_N$  обеспечивает формирование табл. 4.

В табл. 14 отражена доля индивидуальных показателей к суммарному количеству общих показателей ( $S=66$ ).

Табл. 15 содержит значения векторов поправочных коэффициентов для шести матриц, причем четвертый столбец табл. 15 соответствует расчетному значению из табл. 9.

Таблица 14 – Доля индивидуальных показателей для шести матриц исходных данных

Показатели	Номер матрицы					
	1	2	3	4	5	6
$\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m P_{ij}^*$	18	25	30	37	47	50
$\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m P_{ij}^*/S$ (в %)	27,2	37,8	45,4	56	71,2	75,7

Таблица 15 – Таблица значений вектора поправочных коэффициентов  $VCC_{MA}$

Objects	Матрицы моделируемых данных					
	1	2	3	4	5	6
$O_1$	0,729	0,744	0,782	0,813	0,870	0,885
$O_2$	0,713	0,737	0,771	0,804	0,841	0,856
$O_3$	0,849	0,926	0,958	1,081	1,122	1,137

Расчеты итоговых весов по модифицированному МАИ для шести матриц приведены в табл. 16, причем четвертый столбец табл. 16 соответствует расчетному значению из табл. 13.

Таблица 16 – Таблица итоговых весов сравниваемых объектов с учетом  $VCC_{MA}$

Objects	Матрицы данных					
	1	2	3	4	5	6
$O_1$	0,479	0,489	0,514	0,545	0,572	0,582
$O_2$	0,137	0,142	0,148	0,154	0,162	0,165
$O_3$	0,127	0,139	0,144	0,162	0,168	0,171

Пусть по критериям  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  [23–26] сравниваются новые пять инновационных объектов  $ИО_1–ИО_5$  и пусть для них матрица парных сравнений критериев имеет вид согласно табл. 10.

В рамках классического МАИ пусть по каждому критерию  $K_x$  ( $x=1–5$ ) получены значения весов инновационных объектов (табл. 17). На основе данных из табл. 10 и табл. 17 вычислены итоговые веса инновационных объектов (табл. 18).

Таблица 17 – Веса ИО по критериям сравнения

Objects	Критерии				
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$
	0,44	0,26	0,16	0,09	0,06
$ИО_1$	0,45	0,16	0,26	0,25	0,58
$ИО_2$	0,25	0,52	0,28	0,41	0,20
$ИО_3$	0,31	0,33	0,47	0,34	0,22
$ИО_4$	0,27	0,43	0,28	0,21	0,38
$ИО_5$	0,10	0,59	0,48	0,26	0,43

Таблица 18 – Сводная матрица расчета весов ИО

Objects	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	Итог. вес
$ИО_1$	0,196	0,040	0,040	0,023	0,033	0,332
$ИО_2$	0,108	0,132	0,043	0,037	0,011	0,331
$ИО_3$	0,136	0,084	0,073	0,031	0,013	0,336
$ИО_4$	0,118	0,110	0,043	0,019	0,022	0,320
$ИО_5$	0,043	0,152	0,075	0,024	0,025	0,318

Анализ итоговых весов  $ИО_1-ИО_5$ , полученных по классическому МАИ, показывает, что они являются практически неразличимыми, что затрудняет выбор лучшей альтернативы.

Предлагаемый модифицированный МАИ на основе структурно-функциональной декомпозиции инновационных объектов на  $q$  систем позволяет ввести дополнительную информацию об  $ИО_1-ИО_5$  в виде матрицы общих и индивидуальных показателей систем.

Пусть для  $ИО_1-ИО_5$  значения общих и индивидуальных показателей ( $s, p$ ) представлены в табл. 19. При этом принимается  $m=5; q=5; s=6; d=6$ .

Согласно табл. 19 имеется  $S=105$  общих показателей и  $P=85$  индивидуальных показателей. Эти значения подчеркивают статус сравниваемых объектов как инновационных, т.е. объектов, имеющих значительную долю индивидуальных показателей в их описании.

Таблица 19 – Матрица показателей систем для сравниваемых объектов

Object	$T$		$C$		$L$		$E$		$N$		$\Sigma$
	$s$	$p_1$	$s$	$p_2$	$s$	$p_3$	$s$	$p_4$	$s$	$p_5$	
$ИО_1$	4	3	3	4	6	4	5	2	4	3	16
$ИО_2$	5	4	5	3	4	3	3	4	5	2	16
$ИО_3$	5	4	5	4	4	4	4	3	5	2	17
$ИО_4$	4	4	4	5	3	3	3	3	4	3	18
$ИО_5$	4	3	5	4	3	3	4	4	4	4	18
Всего											85

На основе выражений (6), (7) составляется матрица весов общих и индивидуальных показателей, а по ней на основе локальной модели коррекции весов – матрица скорректированных весов (табл.20). Последняя матрица является основой для вычисления вектора поправочных коэффициентов на основе среднегеометрического значения (табл. 21).

Таблица 22 содержит сводную матрицу расчета итоговых весов инновационных объектов как сумму произведений трех множителей: веса критерия ( $K=1-5$ ), веса объекта  $ИО_1-ИО_5$  и элемента вектора поправочных коэффициентов  $VCC_{MGM}$ .

Модифицированный МАИ позволил ранжировать инновационные объекты  $ИО_1-ИО_5$  и выделить лучшую альтернативу – инновационный объект 3 как имеющий больший итоговый вес.

Таблица 20 – Матрица скорректированных весов показателей для  $ИО_1-ИО_5$  на основе локальной модели

Objects	Весы системы $T$		Весы системы $C$		Весы системы $L$		Весы системы $E$		Весы системы $N$	
	$s$	$p$	$s$	$p$	$s$	$p$	$s$	$p$	$s$	$p$
$ИО_1$	0,87		0,72		1,38		0,98		0,82	
$ИО_2$	1,17		1,11		0,86		0,68		0,96	
$ИО_3$	1,17		1,20		0,92		0,84		0,96	
$ИО_4$	0,93		1,04		0,64		0,63		0,82	
$ИО_5$	0,87		1,20		0,64		0,90		0,87	

Таблица 21 – Вектор поправочных коэффициентов

Objects	$VCC_{MGM}$
$ИО_1$	0,930
$ИО_2$	0,937
$ИО_3$	1,010
$ИО_4$	0,798
$ИО_5$	0,880

Таблица 22 – Сводная матрица весов инновационных объектов с учетом вектора поправочных коэффициентов

Objects	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$VCC_{MGM}$	Итоговый вес
	0,44	0,26	0,16	0,09	0,06		
$ИО_1$	0,45	0,16	0,26	0,25	0,58	0,930	0,30
$ИО_2$	0,25	0,52	0,28	0,41	0,20	0,937	0,31
$ИО_3$	0,31	0,33	0,47	0,34	0,22	1,010	0,34
$ИО_4$	0,27	0,43	0,28	0,21	0,38	0,798	0,25
$ИО_5$	0,10	0,59	0,48	0,26	0,43	0,880	0,28

## 5 ОБСУЖДЕНИЕ

В работе были рассмотрены технические инновационные объекты, описываемые общими и индивидуальными показателями с пропорцией 1:2 с количеством критериев сравнения, равным 5, что соответствует классу объектов средней организационной сложности. Исходные значения общих и индивидуальных показателей распределены таким образом, что содержат представителя типового объектов (количество индивидуальных показателей существенно меньше 50%), представителя инновационного объекта (количество индивидуальных показателей больше 50%), представителя объекта в пограничной зоне (количество индивидуальных показателей около 50%).

Классический МАИ определяет объект  $O_3$  как наименее приоритетный среди сравниваемых объектов  $O_1-O_3$ , так как не учитывает индивидуальные особенности инновационного объекта. Напротив, модифицированный МАИ позволяет устранить это ограничение и ввести в расчеты дополнительную информацию. Расширение вычислений в сводной таблице итоговых весов показало, что наименее приоритетным стал объект  $O_2$ , так как он имеет одновременно пониженные значения в матрице парных сравнений по критериям и низкие значения индивидуальных показателей.



Сравнение пяти инновационных объектов  $ИО_1$ – $ИО_5$  классическим и разработанным модифицированным МАИ показало, что классический МАИ не может ранжировать и выделить лучшую альтернативу в силу нивелирования весов инновационных объектов по критериям при их свертке в итоговый вес. Разработанный модифицированный МАИ за счет учета индивидуальных показателей инновационных объектов позволил разнести их на оси измерения итогового веса на расстояния, достаточные для ранжирования и выделения лучшей альтернативы.

В целом, модифицированный метод анализа иерархий отличаются:

- применение структурно-функциональной декомпозиции объектов на системы;
- описание систем объектов матрицей общих и индивидуальных показателей;
- низкая вычислительная сложность моделей коррекции весов и вычисления вектора поправочных коэффициентов.

Данные особенности позволяют применять модифицированный МАИ для сравнения инновационных объектов из различных предметных областей (подвижная техника, космические аппараты, биотехнические изделия, экономические системы и др. [28–34]).

### ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная задача разработки модифицированного МАИ для ранжирования инновационных объектов с применением моделей коррекции весов.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в том, что предложен модифицированный МАИ с учетом структурно-функциональной организации инновационных объектов. На основе данного метода, расширенного моделями коррекции весов и вектором поправочных коэффициентов, получена последовательность ранжирования объектов, учитывающая влияние индивидуальных показателей на выбор лучшего объекта. Модифицированный метод объективно отражает измененный порядок следования объектов-альтернатив с учетом баланса парных оценок альтернатив и их структурно-функционального описания в виде матрицы общих и индивидуальных показателей.

**Практическая значимость** полученных результатов заключается в том, что согласно проведенного моделирования ценным для практики принятия решений следует считать долю индивидуальных показателей в их общем количестве более 55%. В этом случае объекты предпочтительнее оценивать на основе модифицированного МАИ, т.е. с использованием вектора поправочных коэффициентов. Если доля количества индивидуальных показателей к количеству общих показателей меньше 45%, то предпочтительным является классический МАИ. Влияние индивидуальных показателей незначительное. Диапазон [45%–55%] является пограничной зоной для принятия решений по инновационным объектам на основе поправочных

коэффициентов. В целом, модели коррекции весов, введенные в состав МАИ, позволяют получить уточненный порядок следования инновационных объектов с учетом их структурно-функциональной декомпозиции.

Полученный вектор поправочных коэффициентов может иметь самостоятельное применение и использоваться при решении различных расчетно-аналитических задач и прикладных задач принятия решений.

**Перспективы дальнейших исследований** заключаются в применении разработанных моделей коррекции весов и модифицированного метода для сравнения различных инновационных объектов – реконфигурируемые подвижные роботы, биотехнические изделия, мехатронные приводы и др.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность Емельянову Сергею Геннадьевичу, ректору ЮЗГУ, доктору технических наук, профессору, члену-корреспонденту РААСН за техническую помощь в предоставлении научно исследовательской и лабораторной базы для проведения исследований в данной области.

### ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Юдин Д. Б. Математические методы управления в условиях неполной информации / Д. Б. Юдин. – М. : URSS, 2010. – 400 с.
2. Зак Ю. А. Принятие многокритериальных решений / Ю. А. Зак. – М. : Экономика, 2011. – 235 с.
3. Кук Ю. В. Спектральный метод распознавания состояний динамических систем / Ю. В. Кук, Е. И. Лаврикова // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2007. – № 6. – С. 133–140.
4. Saaty T. L. Decision making with the Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty // International Journal of Services Sciences. – 2008. – Vol. 1, No. 1. – P. 83–98.
5. Дубровин В. И. Метод получения вектора приоритетов из нечетких матриц парных сравнений / В. И. Дубровин, Н. А. Миронова // Искусственный интеллект. – 2009. – № 3. – С. 464–470.
6. Щеглов С. Н. Анализ моделей принятия решений в новых информационных технологиях в условиях нечеткости и неопределенности / С. Н. Щеглов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – Т. 132, № 7. – С. 126–131.
7. Groselj P. Evaluation of several approaches for deriving weights in fuzzy group analytic hierarchy process / P. Groselj, Stirn L. Zadnik // Journal of Decision Systems. – 2018. – Vol. 27. – P. 217–226.
8. Sieni E. Migration NSGA : Method to Improve a Non-Elitist Searching of Pareto front with Application in Magnetics / E. Sieni, M. Forzan, P. Di Barba // Inverse Problems in Science and Engineering. – 2016. – Vol. 24, No. 1. – P. 543–566.
9. Wu S. A consistency improving method in the analytic hierarchy process based on directed circuit analysis / S. Wu, X. Liu, Z. Li, Y. Zhou // Journal of Systems En-

- gineering and Electronics. – 2019. – Vol. 30, No. 6. – P. 1160–1181.
10. Подиновский В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 256 с.
  11. Машуров А. Ю. Метод анализа иерархий для определения лучшей альтернативы / А. Ю. Машуров, А. Ф. Винокуров, А. И. Левочки // Молодой ученый. – 2019. – № 17. – С. 34–38.
  12. Watkins D. S. Fundamentals of Matrix Computations / D. S. Watkins // Wiley-Interscience. – 2002. – P. 633.
  13. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Л. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 320 с.
  14. Саати Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях : аналитические сети / Т. Л. Саати. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 360 с.
  15. Comparison of the multicriteria decision-making methods for equity portfolio selection: The U.S. evidence / [E. Patari, V. Karell, P. Luukka et al] // European Journal of Operational Research, 2018. – P. 655–672.
  16. Миронова Н. А. Интеграция модификаций метода анализа иерархий для систем поддержки принятия групповых решений / Н. А. Миронова // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2011. – № 2. – С. 47–57.
  17. Миронова Н. А. Архитектура групповой системы поддержки принятия решений с возможностью синтеза метода принятия групповых решений / Н. А. Миронова, А. А. Скрипник // Системи обробки інформації. – 2012. – Т. 8. – С. 33.
  18. Черкашин А. К. Математические аспекты реализации метода анализа иерархий / А. К. Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2020. – № 1 (17). – С. 5–24.
  19. Подиновский В. В. О некорректности метода анализа иерархий / В. В. Подиновский, О. В. Подиновская // Проблемы управления. – 2011. – № 1. – С. 8–13.
  20. Миронова Н. А. Экспертная система выбора модификации метода анализа иерархий / Н. А. Миронова // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2011. – С. 62–70.
  21. Mousavia S. J. Inferring operating rules for reservoir operations using fuzzy regression and ANFIS / S. J. Mousavia, K. Ponnambalamb, F. Karray // Fuzzy Sets and Systems. – 2007. Vol. 158. – P. 1064–1082.
  22. Тутьгин А. Г. Преимущества и недостатки метода анализа иерархий / А. Г. Тутьгин, В. Б. Коробов // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. Естественные и точные науки. – 2010. – № 122. – С. 108–115.
  23. Пшихопов В. Х. Оценивание и управление в сложных динамических системах / В. Х. Пшихопов, М. Ю. Медведев. – М. : Физматлит, 2009. – 294 с.
  24. Methods of Recognition Based on the Function of Rival Similarity / [N. G. Zagoruiko, I. A. Borisova, V. V. Dyubanov et al] // Pattern Recognition and Image Analysis, 2008. – Vol. 18, No. 1. – P. 1–6.
  25. Тетерин Д. П. Синтез требований к бортовому информационно-измерительному и моделирующему комплексу / Д. П. Тетерин // Информационно-управляющие системы. – 2009. – № 1. – С. 10–14.
  26. Локальная математическая модель подготовки данных для сравнения инновационных объектов / [Е. А. Титенко, О. Г. Добросердов, Л. А. Лисицин и др.] // Инновации. – 2019. – № 12. – С. 74–81.
  27. Анфилатов В. С. Системный анализ в управлении: учебное пособие / В. С. Анфилатов, А. А. Емельянов, А. А. Кукушкин. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
  28. Ostroukh A.V., Elhadi H. Comparative study of routing protocols in vehicular ad-hoc networks (vanets) / A. V. Ostroukh, H. Elhadi // International Journal of Advanced Studies (iJAS). – 2014. – Vol. 4, No 2. – P. 9–14.
  29. Трахтенгерц Э. А. Компьютерные системы и методы поддержки информационного управления / Э. А. Трахтенгерц. – М. : СИНТЕГ, 2010. – 135 с.
  30. Титенко Е. А. Модифицированная производственная система и специализированное производственное устройство для поддержки решения проблемно-поисковых задач / Е. А. Титенко, Т. А. Мирталибов // Вісник ДУІКТ. – 2013. – № 3. – С. 13–19.
  31. Математические модели коррекции весов инновационных объектов / [Е. А. Титенко, В. В. Варганов, С. Н. Фролов и др.] // Робототехника и искусственный интеллект : XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: тезисы докладов. – Железнодорожск : Сибирский федеральный университет, 2019. – С. 154–160.
  32. Остроух А. В. Интеллектуальные информационные системы и технологии : монография / А. В. Остроух, Н. Е. Суркова. – Красноярск : Научно-инновационный центр, 2015. – 370 с.
  33. Andronov V. G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits. / V. G. Andronov, S. G. Emelyanov // Journal of Applied Engineering Science. – 2018. – Vol. 16, № 1. – P. 107–110.
  34. Многоагентные системы в технической диагностике сложных технических объектов / [Т. А. Мирталибов, С. Н. Фролов, А. Л. Ханис и др.] // Известия Юго-Западного университета. – 2015. – № 3. – С. 18–25.

Статья поступила в редакцию 23.03.2020.  
После доработки 21.09.2020.

УДК 004.023

#### МОДЕЛІ ОБЧИСЛЕННЯ ВАГ ДЛЯ ОЦІНКИ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

**Титенко Є. А.** – канд. техн. наук, доцент, провідний науковий співробітник центру перспективних досліджень і розробок, південно-західний державний університет, Курськ, Росія.

**Фролов С. Н.** – канд. техн. наук, провідний науковий співробітник центру перспективних досліджень і розробок, південно-західний державний університет, Курськ, Росія.

**Ханіс А. Л.** – канд. військ. наук, доцент кафедри інформаційної безпеки, південно-західний державний університет, Курськ, Росія.

**Добросердов О. Г.** – д-р техн. наук, старший науковий співробітник, радник при ректораті, південно-західний державний університет, Курськ, Росія.

**Захаренков А. І.** – д-р техн. наук, професор, перший заступник генерального директора, АТ «Воентелеком», Москва, Росія.

**Попов О. М.** – генеральний директор, АТ «Авіаавтоматика» ім. В. В. Тарасова, Курськ, Росія.

**Дронова Т. А.** – д-р мед. наук, професор кафедри пропедевтики внутрішніх хвороб, Курський державний медичний університет, Курськ, Росія.

#### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Актуальність роботи пов'язана з багатокритеріальним порівнянням інноваційних об'єктів, під якими розуміються об'єкти з частково співпадаючими індивідуальними показниками, що мають невизначені, суб'єктивні значення і критерії їх оцінки. Порівнювані інноваційні об'єкти описуються загальними та індивідуальними показниками, причому кількість індивідуальних показників є значною (більше 50%). Метод аналізу ієрархій є найбільш підходящим математичним апаратом для порівняння інноваційних об'єктів, так як він поєднує наочність опису предметної області, чисельну результативність, природний облік варіативності вихідних парних оцінок. Проте, даний метод слабо враховує індивідуальні показники інноваційних об'єктів при складанні матриць парних порівнянь, що не дозволяє отримати підсумкові ваги, відповідні індивідуальним особливостям інноваційних об'єктів.

**Ціль.** Розробка модифікованого методу аналізу ієрархій, що забезпечує ранжування інноваційних об'єктів з частково співпадаючими індивідуальними показниками.

**Метод.** В роботі розроблено модифікований метод аналізу ієрархій, що включає типову послідовність етапів від побудови ієрархії предметної області і формування критеріїв оцінки інноваційних об'єктів до етапу обчислення підсумкових ваг інноваційних об'єктів, що відрізняється по-перше, введенням на етапі побудови ієрархії предметної області матриці ваг загальних та індивідуальних показників по системам об'єктів, по-друге розрахунком поправочних коефіцієнтів на основі локальної або глобальної моделей корекції ваг показників систем об'єктів на етапі складання зведеної таблиці ваг, по-третє обчисленням підсумкових ваг інноваційних об'єктів з урахуванням поправочних коефіцієнтів, що дозволило врахувати індивідуальні особливості порівнюваних інноваційних об'єктів.

**Результати.** У роботі розглянуто інноваційні об'єкти із загальними та індивідуальними показниками в пропорції 1: 2 з кількістю критеріїв порівняння, що дорівнює 5, що відповідає класу об'єктів середньої організаційної складності. Порівнювані об'єкти містять Типовий об'єкт (кількість індивідуальних показників істотно менше 50%), явно інноваційний об'єкт (кількість індивідуальних показників більше 50%), об'єкт в прикордонній зоні (кількість індивідуальних показників близько 50%). Класичний метод не чутливий до індивідуальних особливостей інноваційних об'єктів, що визначило мінімальну вагу для явно інноваційного об'єкта. Модифікований метод, навпаки, визначив мінімальну вагу для об'єкта в прикордонній зоні, так як він має одночасно знижені значення в матриці парних порівнянь за критеріями і низькі значення індивідуальних показників.

**Висновки.** Розроблений модифікований метод аналізу ієрархій і моделі корекції в його складі об'єктивно відображають порядок ранжирування об'єктів з урахуванням їх опису у вигляді матриці загальних і індивідуальних показників. Згідно з моделюванням, цінним для практики прийняття рішень слід вважати частку індивідуальних показників в їх загальній кількості більше 55%. У цьому випадку об'єкти краще оцінювати на основі модифікованого методу аналізу ієрархій. Отриманий на основі моделі корекції ваг вектор поправочних коефіцієнтів має самостійне значення при вирішенні різних розрахунково-аналітичних задач і прикладних задач прийняття рішень.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** інноваційний високотехнологічний об'єкт, модель корекції ваг, Розширена зведена таблиця, вектор поправочних коефіцієнтів, метод аналізу ієрархій.

УДК 004.023

#### MODELS FOR CALCULATING WEIGHTS FOR ESTIMATION INNOVATIVE TECHNICAL OBJECTS

**Titenko E. A.** – PhD, Associate Professor, Leading Researcher of the Center for Advanced Research and development, South-Western state University, Kursk, Russia.

**Frolovs N. S.** – PhD, Leading Researcher at the Center for Advanced Research and Development, South-Western state University, Kursk, Russia.

**Khanis A. L.** – PhD, Associate Professor of the Department of Information security, South-Western state University, Kursk, Russia.

**Dobroserdov O. G.** – Dr. Sc., Senior Researcher, Adviser to the rector, South-Western state University, Kursk, Russia.

**Zakharenkov A. I.** – Dr. Sc., Professor, first Deputy General Director, Voentelcom JSC, Moscow, Russia.

**Popov A. N.** – General Director, V. V. Tarasov Aviaavtomatika JSC, Kursk, Russia.

**Dronova T. A.** – Dr. Sc., Professor of Propaedeutics of Internal Diseases, Kursk State Medical University of the Ministry of health of the Russian Federation, Kursk, Russia.

## ABSTRACT

**Relevance.** The relevance of the work is associated with a multi-criteria comparison of innovative objects, which are understood as objects with partially identical individual indicators that have uncertain, subjective values and criteria for their evaluation. Compared innovation objects are described by General and individual indicators, and the number of individual indicators is significant (more than 50%). The hierarchy analysis method is the most suitable mathematical tool for comparing innovative objects, since it combines visual description of the subject area, numerical performance, and natural accounting for the variability of the initial pair estimates. However, this method does not take into account the individual indicators of innovative objects when compiling matrices of paired comparisons, which does not allow you to get the final weights corresponding to the individual characteristics of innovative objects.

**Object.** Development of a modified hierarchy analysis method that provides ranking of innovative objects with partially identical individual indicators.

**Method.** In this work, a modified method of analysis of hierarchies, comprising a typical sequence of stages from building a hierarchy of the subject area and the establishment of criteria for evaluation of innovative objects to the stage computing the final weights of innovative objects, a first introduction on the stage of building a hierarchy of the weights matrix shared and individual performance in the system of objects, and secondly by calculating correction factors based on local or global models of correction of weights of parameters of systems of objects at the stage of preparation of the consolidated table of weights, thirdly the computation of the final weights of innovative features based on a correction factor that took into account individual features comprise innovative.

**Results.** The paper considers innovative objects with General and individual indicators in the ratio of 1:2 with the number of comparison criteria equal to 5, which corresponds to the class of objects of average organizational complexity. The objects being compared contain a typical object (the number of individual indicators is significantly less than 50%), a clearly innovative object (the number of individual indicators is more than 50%), and an object in the border zone (the number of individual indicators is about 50%). The classical method is not sensitive to the individual characteristics of innovative objects, which determined the minimum weight for a clearly innovative object. The modified method, on the contrary, determined the minimum weight for the object in the border zone, since it has both reduced values in the matrix of paired comparisons by criteria and low values of individual indicators.

**Conclusions.** The developed modified method of hierarchy analysis and correction models in its composition objectively reflect the order of ranking of objects, taking into account their description in the form of a matrix of General and individual indicators. According to the modeling, the share of individual indicators in their total number of more than 55% should be considered valuable for decision-making practice. In this case, it is preferable to evaluate objects based on a modified hierarchy analysis method. The vector of correction coefficients obtained on the basis of the weight correction model has an independent value in solving various computational and analytical problems and applied decision-making problems.

**KEYWORDS:** innovative high-tech object, a model for weight correction, an extended summary table, a vector of correction coefficients, and a method for analyzing hierarchies.

## REFERENCES

1. Judin D. B. *Matematicheskie metody upravleniya v usloviyah nepolnoj informacii*. Moscow, URSS, 2010, 400 p.
2. Zak Ju. A. *Prinjatje mnogokriterial'nyh reshnij*. Moscow, Jekonomika, 2011, 235 p.
3. Kuk Ju. V., Lavrikova E. I. *Spektral'nyj metod raspoznavanija sostojanij dinamicheskikh sistem, Komp'yuterni zasobi, merezhi ta sistemi*, 2007, No. 6, pp. 133–140.
4. Saaty T. L. *Decision making with the Analytic Hierarchy Process*, *International Journal of Services Sciences*, 2008, Vol. 1, No. 1, pp. 83–98.
5. Dubrovin V. I., Mironova N. A. *Metod poluchenija vektora prioritetov iz nechetkih matric parnyh sravnenij, Iskustvennyj intellekt*, 2009, No. 3, pp. 464–470.
6. Shheglov S. N. *Analiz modelej prinjatija reshenij v novyh informacionnyh tehnologijah v usloviyah nechetkosti i neopredelennost, Izvestija JuFU. Tehniceskie nauk*, 2012. Vol. 132, No. 7, pp. 126–131.
7. Grosej P., Zadnik Stirn L. *Evaluation of several approaches for deriving weights in fuzzy group analytic hierarchy process*, *Journal of Decision Systems*, 2018, Vol. 27, pp. 217–226.
8. Sieni E., Forzan M., Barba P. *Di Migration NSGA : Method to Improve a Non-Elitist Searching of Pareto front with Application in Magnetics*, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2016, Vol. 24, No. 1, pp. 543–566.
9. Wu S., Liu X., Li Z., Zhou Y. *A consistency improving method in the analytic hierarchy process based on directed circuit analysis*, *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2019, Vol. 30, No. 6, pp. 1160–1181.
10. Podinovskij V. V., Nogin V. D. *Pareto-optimal'nye reshenija mnogokriterial'nyh zadach*. Moscow, FIZMATLIT, 2007, 256 p.
11. Mashurov A. Ju., Vinokurov A. F., Levochko A. I. *Metod analiza ierarhij dlja opredelenija luchshej al'ternativy, Molodoj uchenyj*, 2019, No. 17, pp. 34–38.
12. Watkins D. S. *Fundamentals of Matrix Computations*, *Wiley-Interscience*, 2002, P. 633.
13. Saati T. L. *Prinjatje reshenij. Metod analiza ierarhij*. Moscow, Radio i svjaz', 1993, 320 p.
14. Saati T. L. *Prinjatje reshenij pri zavisimostjah i obratnyh svjazjah : analiticeskie seti*. Moscow, Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2009, 360 p.
15. Patari E., Karell V., Luukka P. et al *Comparison of the multicriteria decision-making methods for equity portfolio selection: The U.S. evidence*, *European Journal of Operational Research*, 2018, pp. 655–672.
16. Mironova N. A. *Integracija modifikacij metoda analiza ierarhii dlja sistem podderzhki prinjatija gruppyvnyh reshenij*, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2011, No. 2, pp. 47–57.

17. Mironova N. A., Skripnik A. A. Arhitektura gruppovoj sistemy podderzhki prinjatija reshenij s vozmozhnost'ju sinteza metoda prinjatija gruppovyh reshenij, *Sistemi obrobki informacii*, 2012, Vol. 8, P. 33.
18. Cherkashin A. K. Matematicheskie aspekty realizacii metoda analiza ierarhij, *Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii*, 2020, No. 1 (17), pp. 5–24.
19. Podinovskij V. V., Podinovskaja O. V. O nekorrektnosti metoda analiza ierarhij, *Problemy upravlenija*, 2011, No. 1, pp. 8–13.
20. Mironova N. A. Jekspertnaja sistema vybora modifikacii metoda analiza ierarhij, *Avtomatizirovannye sistemy upravlenija i pribory avtomatiki*, 2011, pp. 62–70.
21. Mousavia S. J., Ponnambalamb K., Karray F. Inferring operating rules for reservoir operations using fuzzy regression and ANFIS, *Fuzzy Sets and Systems*, 2007, Vol. 158, pp. 1064–1082.
22. Tutygin A. G., Korobov V. B. Preimushhestva i nedostatki metoda analiza ierarhij, *Izvestija Rossijskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A. I. Gercena. Estestvennye i tochnye nauki*, 2010, No. 122, pp. 108–115.
23. Pshihopov V. H., Medvedev M. Ju. Ocenivanie i upravlenie v slozhnyh dinamicheskikh sistemah. Moscow, Fizmatlit, 2009, 294 p.
24. Zagoruiko N. G., Borisova I. A., Dyubanov V. V. et al. Methods of Recognition Based on the Function of Rival Similarity, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2008, Vol. 18, No. 1, pp. 1–6.
25. Teterin D. P. Sintez trebovanij k bortovomu informacionno-izmeritel'nomu i modelirujushhemu kompleksu, *Informacionno- upravljajushhie sistemy*, 2009, No. 1, pp. 10–14.
26. Titenko E. A., Dobroserdov O. G., Lisicin L. A. et al. Lokal'naja matematicheskaja model' podgotovki dannyh dlja sravnenija innovacionnyh ob'ektov, *Innovacii*, 2019, No. 12, pp. 74–81.
27. Anfilatov V. S. Emel'janov A. A., Kukushkin A. A. Sistemnyj analiz v upravlenii: uchebnoe posobie. Moscow, Finansy i statistika, 2002, 368 p.
28. Ostroukh A. V., Elhadi H. Comparative study of routing protocols in vehicular ad-hoc networks (vanets), *International Journal of Advanced Studies (iJAS)*, 2014, Vol. 4, No. 2, pp. 9–14.
29. Trahtengerc Je. A. Komp'juternye sistemy i metody podderzhki informacionnogo upravlenija. Moscow, SINTEG, 2010, 135 p.
30. Titenko E. A., Mirtalibov T. A. Modificirovannaja produkcionnaja sistema i specializirovannoe produkcionnoe ustrojstvo dlja podderzhki reshenija problemno-poiskovyh zadach, *Visnik DUIKT*, 2013, No. 3, pp. 13–19.
31. Titenko E. A., Varganov V. V., Frolov S. N. i dr. Matematicheskie modeli korrekcii vesov innovacionnyh ob'ektov, *Robototehnika i iskusstvennyj intellekt : XI Vserossijskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija s mezhdunarodnym uchastiem: tezisy dokladov*. Zheleznogorsk, Sibirskij federal'nyj universitet, 2019, pp. 154–160.
32. Ostrouh A. V., Surkova N. E. Intellektual'nye informacionnye sistemy i tehnologii: Monografija. Krasnojarsk, Nauchno-innovacionnyj centr, 2015, 370 p.
33. Andronov V. G., Emelyanov S. G. Autonomous navigation and attitude control of spacecrafts on near-earth circular orbits, *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, Vol. 16, No. 1, pp. 107–110.
34. Mirtalibov T. A., Frolov S. N., Hanis A. L. i dr. Mnogo-agentnye sistemy v tehnicheskoi diagnostike slozhnyh tehnicheskikh ob'ektov, *Izvestija Jugo-Zapadnogo universiteta*, 2015, No. 3, pp. 18–25.