Научная статья
УДК 519.816:519.853; DOI: 10.61260/2218-13X-2023-3-54-62

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТРЕУГОЛЬНЫХ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В МАТРИЦЕ ПОПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ

✉Пефтибай Георгий Иванович;
Галухин Николай Александрович;
Ивахненко Андрей Викторович.
Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС Донецкой Народной Республики, г. Донецк, Россия
✉niigd.osmas-1@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке метода расчета треугольных весовых коэффициентов в нечеткой задаче принятия решения. Цель работы – повышение точности определения треугольных весовых коэффициентов. Для достижения указанной цели применена совокупность методов научного и эмпирического исследования: анализ и декомпозиция проблемы на две задачи, методы математического программирования и нечеткой математики, метод сравнения. Искомые весовые коэффициенты представлены в параметрическом виде с неодинаковыми параметрами нечеткости, что позволило выделить и формализовать две задачи: определение модальных значений и задачу определения параметров нечеткости. Обе задачи сформулированы в терминах нелинейного математического программирования. Предложенный метод отличается от известных тем, что в качестве оптимизируемых переменных использованы параметры нечеткости треугольных чисел, которые приняты неодинаковыми для левой и правой границ во всех весовых коэффициентах.

Предложенный подход позволил повысить точность определения весовых коэффициентов. Проверку точности проводили методом сравнения с известным методом LLSM на двух матрицах. Расчеты показали, что интегральная абсолютная ошибка предложенного метода более чем в два раза меньше, чем у известного метода по каждой из матриц.

Ключевые слова: матрица, попарное сравнение, весовые коэффициенты, треугольные числа, параметр нечеткости, нелинейное программирование, система ограничений, абсолютная точность

Для цитирования: Пефтибай Г.И., Галухин Н.А., Ивахненко А.В. Параметрический метод расчета треугольных весовых коэффициентов в матрице попарных сравнений // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2023. № 3. С. 54–62. DOI: 10.61260/2218-13X-2023-3-54-62.

Scientific article

PARAMETRICAL METHOD FOR CALCULATION OF TRIANGULAR WEIGHT COEFFICIENTS IN MATRIX OF PAIRED COMPARISONS

✉Peftibay Georgy I.;
Galukhin Nikolay A.;
Ivakhnenko Andrey V.
Scientific research institute «Respirator» of EMERCOM of the Donetsk People's Republic, Donetsk, Russia
✉niigd.osmas-1@mail.ru

Abstract. The article deals with development of the method for calculation of triangular weight coefficients in fuzzy problem of decision making. The study objective is to improve the accuracy of triangular weight coefficient determination. In order to achieve the above-mentioned objective, a set of methods of scientific and empirical investigation: analysis and splitting of the problem into two tasks, methods of mathematical programming and fuzzy logic, method of comparison. The required weight coefficients are represented in a parametrical form with unlike fuzzy parameters which allowed for two tasks to be separated and formalized: determination of modal values and the task to determine fuzziness parameters. Both tasks have been formulated in terms of non-linear mathematical programming. The proposed method differs from the known ones by using the parameters of triangular numbers fuzziness as optimized variables which are assumed to be different for the left and right borders in all weight coefficients.

The proposed approach allowed for the accuracy of weight coefficients to be improved. The accuracy validation was conducted comparing with the known LLSM method on two matrices. The calculations have demonstrated that the integral absolute error of the proposed method more than twice smaller than that of the know method for each of the matrices.

Keywords: matrix, paired comparison, weight coefficients, triangular numbers, fuzziness parameter, non-linear programming, set of constraints, absolute precision

For citation: Peftibay G.I., Galukhin N.A., Ivakhnenko A.V. Parametrical method for calculation of triangular weight coefficients in matrix of paired comparisons // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2023. № 3. P. 54–62. DOI: 10.61260/2218-13X-2023-3-54-62.

Введение

Метод анализа иерархий в нечеткой постановке (НМАИ) применяется для решения многокритериальных задач принятия решений в случае, когда хотя бы один из критериев (признаков, показателей, факторов) является качественным, неточным, нечетким или трудноизмеримым. В результате формального представления критериев возникает неопределенность, связанная с опытом, предпочтениями, интуицией и индивидуальными суждениями лиц, принимающих решения. В НМАИ указанные неопределенности учитываются с помощью нечетких чисел. Одними из основных задач этого метода являются получение нечеткой матрицы попарных сравнений (НМПС) и определение нечетких весовых коэффициентов, которые предназначены для учета степени важности критерия в аддитивной свертке, то есть для учета неодинакового влияния каждого критерия на конечную оценку, поставленную в соответствие каждой альтернативе.

В публикации [1] предложена модификация НМАИ, в которой относительный приоритет проектов определяют, используя четкий метод анализа иерархий. Метод нечеткого логического вывода используется для фазификации входных и выходных переменных и для получения глобальных приоритетов проектов. В работе не приведена оценочная шкала для ранжирования проектов по критериям. Метод Чанга [2] – наиболее известный метод получения весовых коэффициентов, именуемый также как метод расширенного анализа. Суть метода состоит в нахождении степени предпочтительности нормализованных построчных сумм в НМПС и весовых коэффициентов как отношения степени предпочтительности строки к сумме предпочтительностей всех строк. Наибольшей критике метод Чанга подвергается за возможность получения нулевых значений весовых коэффициентов, что означает исключение некоторых критериев из аддитивной свертки.

В работе [3] проведен детальный анализ метода Чанга, на примерах показана иррациональность применения этого метода в нескольких практических приложениях. В работе [4] предложен метод программирования нечетких предпочтений FPP, в результате которого получают четкие весовые коэффициенты (приоритеты) из неполного множества нечетких суждений. Формально решение задачи представлено в виде математической модели нелинейного математического программирования с системой ограничений. В работе введена степень согласованности нечетких суждений, которую получают при экстремальном значении целевой функции. Положительное значение степени согласованности означает согласованность, а отрицательное – не согласованность НМПС. Метод получения весовых коэффициентов на основе генетического алгоритма [5] идейно базируется на математических соотношениях метода FPP, но для решения оптимизационной задачи применяется метод эволюционного поиска – генетический алгоритм, предложена мера согласованности нечетких суждений. Результаты расчетов весовых коэффициентов методом FPP и методом на основе генетического алгоритма согласуются. Известна группа методов расчёта весовых коэффициентов, основанных на дефазификации НМПС [6–8] с последующим вычислением вектора весовых коэффициентов по стандартной процедуре четкого метода анализа иерархий. Дефазификация элементов НМПС проводится методом центра тяжести. В публикациях [9, 10] использованы метрики (расстояния по Евклиду или Хеммингу) для представления нечеткого числа четким интервалом. Все вышеупомянутые методы позволяют определить точечные или четкие интервальные значения весовых коэффициентов. Однако наиболее адекватным представлением весовых коэффициентов, соответствующих природе треугольной НМПС, являются треугольные весовые коэффициенты – нечеткие множества. Одним из наиболее известных методов получения треугольных весовых коэффициентов является «модифицированный нечеткий логарифмический метод наименьших квадратов (LLSM)» [3]. Неизвестные весовые коэффициенты находятся из выражения для суммы квадратов разностей логарифмов отношения весовых коэффициентов треугольных нечетких чисел НМПС (левой и правой границ, модального значения), представляющих собой нелинейную целевую функцию. Система ограничений представлена линейными уравнениями и неравенствами для левых и правых границ и основного уравнения нормализованных модальных значений. Недостаток метода LLSM состоит в большом расстоянии между левой и правой границами [4] при его использовании в различных приложениях.

В связи с вышеизложенным повышение точности определения треугольных весовых коэффициентов является актуальной задачей, решение которой позволит повысить уровень обоснованности и достоверности принятия решения в многокритериальных задачах.

Цель работы – разработка метода получения треугольных весовых коэффициентов повышенной точности.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– получить модальные и граничные значения весовых коэффициентов;

– определить нечеткие треугольные весовые коэффициенты;

– -выполнить сравнение точности расчета треугольных весовых коэффициентов известным (LLSM) и предлагаемым методами.

Методы исследования

В процессе исследований в работе был использован комплекс теоретических и эмпирических методов научного познания. Метод анализа применен после декомпозиции проблемы на две части: задачу нахождения модальных значений и задачу нахождения граничных значений треугольных нечетких весовых коэффициентов. Анализ выделенных задач показал, что каждая из них может быть сведена к оптимизационной задаче и решена методом нелинейного математического программирования [11]. В качестве целевых функций использована метрика Хемминга (интегральная абсолютная ошибка) между расчётными выражениями и фактическими значениями элементов НМПС. При выводе математических соотношений использованы методы нечеткой математики для операций над нечеткими треугольными числами и их представлениями в параметрическом виде. Для подтверждения повышенной точности расчетных значений треугольных весовых коэффициентов применен метод сравнения интегральной абсолютной ошибки разработанного и известного (LLSM) методов нахождения треугольных весовых коэффициентов на двух НМПС, взятых из литературных источников, включая зарубежные.

Результаты исследования

Пусть дана матрица с элементами в виде нечетких треугольных попарных сравнений Ã.

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} (1;1;1) & (l_{12};m_{12};u_{12}) & \dots & (l_{1n};m_{1n};u_{1n}) \\ (l_{21};m_{21};u_{21}) & (1;1;1) & \dots & (l_{2n};m_{2n};u_{2n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (l_{n1};m_{n1};u_{n1}) & (l_{n2};m_{n2};u_{n2}) & \dots & (1;1;1) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Каждый элемент НМПС Ã (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) $i \neq j$ может быть представлен в виде отношения треугольных весовых коэффициентов:

$$(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) \approx \frac{w_i}{w_j}, \quad (2)$$

где l_{ij}, u_{ij} – левая и правая границы треугольных чисел матрицы (1); m_{ij} – мода треугольного числа матрицы (1); w_i, w_j – нечеткие треугольные весовые коэффициенты i-го и j-го критерия; $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, i \neq j$; n – размерность матрицы.

Весовые коэффициенты, включая и нормализованные, можно записать в параметрическом виде с неодинаковыми параметрами нечеткости:

$$w_i = \left(w_i^M - P_i^L, w_i^M, w_i^M + P_i^U\right), w_j = \left(w_j^M - P_j^L, w_j^M, w_j^M + P_j^U\right), \quad (3)$$

где w_i^M, w_j^M – моды весовых коэффициентов i-го и j-го критерия; P_i^L, P_j^L – параметры нечеткости левой границы весовых коэффициентов i-го и j-го критерия; P_i^U, P_j^U – параметры нечеткости правой границы весовых коэффициентов i-го и j-го критерия.

Тогда, согласно уравнению (2), получаем:

$$(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) \approx \frac{\left(w_i^M - P_i^L, w_i^M, w_i^M + P_i^U\right)}{\left(w_j^M - P_j^L, w_j^M, w_j^M + P_j^U\right)} = \left(\frac{w_i^M - P_i^L}{w_j^M + P_j^U}, \frac{w_i^M}{w_j^M}, \frac{w_i^M + P_i^U}{w_j^M - P_j^L}\right). \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что:

$$l_{ij} \approx \frac{w_i^M - P_i^L}{w_j^M + P_j^U}, m_{ij} \approx \frac{w_i^M}{w_j^M}, u_{ij} \approx \frac{w_i^M + P_i^U}{w_j^M - P_j^L}. \quad (5)$$

Поскольку выражение для моды $m_{ij} \approx \frac{w_i^M}{w_j^M}$ не зависит от параметров нечеткости, то определение величины w_i^M может быть осуществлено в рамках отдельной оптимизационной задачи с целевой функцией:

$$H_1 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1, i \neq j}^{n} \left| m_{ij} - \frac{w_i^M}{w_j^M} \right| \to min \quad (6)$$

и ограничениями, связанными с нормализацией весовых коэффициентов.

$$\sum_{i=1}^{n} w_i^M = 1, w_i^M > 0. \quad (7)$$

Целевую функцию (6) можно понимать как расстояние по Хеммингу или абсолютную ошибку между исходными и расчетными значениями мод. В результате компьютерного решения нелинейной задачи математического программирования с целевой функцией (6) и ограничениями (7) получаем числовые значения w_i^M. Поскольку уравнение (5) выполняется приближенно, то получение неизвестных P_i^L, P_i^U может быть осуществлено в рамках решения оптимизационной задачи с целевой функцией:

$$H_2 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1, i \neq j}^{n} \left(\left| \frac{w_i^M - P_i^L}{w_j^M + P_j^U} - l_{ij} \right| + \left| \frac{w_i^M + P_i^U}{w_j^M - P_j^L} - u_{ij} \right| \right) \to min. \quad (8)$$

Систему ограничений получим из следующих соображений: левые границы – неотрицательные числа, разности, находящиеся в знаменателях (8), – не равны нулю, все параметры нечеткости – не отрицательные числа. То есть получаем следующую систему ограничений:

$$\begin{cases} 0 \leq P_i^L < w_i^M \\ P_i^U \geq 0 \\ i = 1, \dots, n \end{cases}. \quad (9)$$

Оптимизационная задача с целевой функцией (8) и ограничениями (9) относится к нелинейным задачам математического программирования и в общем случае решается численными методами, например, с помощью функции «Поиск решения» в программе Microsoft Office Excel. Результатом решения являются значения P_i^L и P_i^U, по которым совместно с ранее найденными модами w_i^M по формуле (3) находят нормализованные треугольные весовые коэффициенты.

Сравнение точности расчета весовых коэффициентов предложенным методом и наиболее известным и широко применяемым методом LLSM выполним на двух НМПС, взятых из литературных источников, включая зарубежные. Матрица $\widetilde{\text{B}}$, приведенная в работе [12], содержит следующие треугольные элементы:

$$\widetilde{\text{B}} = \begin{pmatrix} (1;1;1) & (2{,}5;3;3{,}5) & (2{,}5;3;3{,}5) \\ (0{,}29;0{,}33;0{,}4) & (1;1;1) & (0{,}67;1;1{,}5) \\ (0{,}29;0{,}33;0{,}4) & (0{,}67;1;1{,}5) & (1;1;1) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Расчет треугольных весовых коэффициентов предложенным методом для матрицы (10) показал следующие результаты:

$$w_1 = (0{,}600; 0{,}600; 0{,}618);$$
$$w_2 = (0{,}177; 0{,}200; 0{,}240);$$
$$w_3 = (0{,}177; 0{,}200; 0{,}240).$$

По полученным значениям весовых коэффициентов рассчитаем элементы НМПС:

$$\frac{w_1}{w_2} = (2{,}500; 3; 3{,}492); \quad \frac{w_1}{w_3} = (2{,}500; 3; 3{,}492); \quad \frac{w_2}{w_1} = (2{,}86; 0{,}333; 0{,}400);$$
$$\frac{w_2}{w_3} = (0{,}738; 1; 1{,}356); \quad \frac{w_3}{w_1} = (2{,}860; 0{,}333; 0{,}400); \quad \frac{w_3}{w_2} = (0{,}738; 1; 1{,}356).$$

Используя полученные расчетные данные, составляем расчетную НМПС:

$$\widetilde{\mathrm{B}}_1 = \begin{pmatrix} (1;1;1) & (2{,}500;3;3{,}492) & (2{,}500;3;3{,}492) \\ (0{,}286;0{,}333;0{,}400) & (1;1;1) & (0{,}738;1;1{,}356) \\ (0{,}286;0{,}333;0{,}400) & (0{,}738;1;1{,}356) & (1;1;1) \end{pmatrix}.$$

Найдем интегральную (суммарную) абсолютную ошибку между элементами исходной $\widetilde{\mathrm{B}}$ и расчетной $\widetilde{\mathrm{B}}_1$ матрицами, используя расстояние по Хеммингу:

$$\rho_1 = |3{,}5 - 3{,}492| \cdot 2 + |0{,}290 - 0{,}286| + |0{,}738 - 0{,}670| + |1{,}500 - 1{,}356| + \\ + |0{,}290 - 0{,}286| + |0{,}738 - 0{,}670| + |1{,}500 - 1{,}356| = 0{,}448.$$

Аналогичные расчеты проведем, используя метод LLSM. В публикации [12] приведены расчетные значения треугольных весовых коэффициентов $w_1 = (0{,}59; 0{,}60; 0{,}59)$, $w_2 = (0{,}17; 0{,}20; 0{,}24)$, $w_3 = (0{,}17; 0{,}20; 0{,}24)$, полученные методом LLSM. Легко заметить ошибочность расчетов для w_1, поскольку правая граница треугольного числа меньше его моды. Поэтому авторами пересчитаны значения w_1, w_2, w_3 методом LLSM, используя математические модели, приведенные в источниках [3], [12]. Уточненные значения весовых коэффициентов имеют вид:

$$w_1 = (0{,}560; 0{,}600; 0{,}667);$$
$$w_2 = (0{,}162; 0{,}200; 0{,}224);$$
$$w_3 = (0{,}163; 0{,}200; 0{,}224).$$

Аналогично предыдущим вычислениям, получим расчётную НМПС для метода LLSM:

$$\widetilde{\mathrm{B}}_2 = \begin{pmatrix} (1;1;1) & (2{,}500;3;4{,}117) & (2{,}500;3;4{,}092) \\ (0{,}243;0{,}333;0{,}400) & (1;1;1) & (0{,}723;1;1{,}374) \\ (0{,}244;0{,}333;0{,}400) & (0{,}728;1;1{,}383) & (1;1;1) \end{pmatrix}.$$

Интегральная абсолютная ошибка между матрицами $\widetilde{\mathrm{B}}$ и $\widetilde{\mathrm{B}}_2$ равна $\rho_2 = 1{,}038$.

Сравнивая ρ_1 и ρ_2, заключаем, что интегральная абсолютная ошибка предложенного метода в 2,32 раза меньше, чем у метода LLSM.

Проверим точность предложенного метода еще на одной НМПС [4], имеющей вид:

$$\check{\mathrm{C}} = \begin{pmatrix} (1;1;1) & (2;3;4) & (1;2;3) \\ (0{,}250;0{,}333;0{,}500) & (1;1;1) & (0{,}333;0{,}500;1) \\ (0{,}333;0{,}500;1) & (1;2;3) & (1;1;1) \end{pmatrix}.$$

Предложенный метод расчёта весовых коэффициентов показал следующие результаты для матрицы $\check{\mathrm{C}}$:

$$w_1 = (0{,}483; 0{,}546; 0{,}723),$$
$$w_2 = (0{,}181; 0{,}181; 0{,}242),$$
$$w_3 = (0{,}241; 0{,}273; 0{,}543).$$

Вычисляя отношения $\frac{w_i}{w_j}$, получим расчетную матрицу попарных сравнений $\check{\mathrm{C}}_1$:

$$\check{C}_1 = \begin{pmatrix} (1;1;1) & (2;3{,}017;3{,}990) & (0{,}890;2;2{,}668) \\ (0{,}250;0{,}332;0{,}501) & (1;1;1) & (0{,}333;0{,}663;1{,}004) \\ (0{,}333;0{,}500;1{,}124) & (0{,}996;0{,}508;3) & (1;1;1) \end{pmatrix}.$$

Интегральная абсолютная ошибка между элементами матрицы $\check{C}$ и $\check{C}_1$ равна $\rho_3 = 1{,}259$.

Применяя известный метод LLSM к матрице $\check{C}$, получим следующие значения весовых коэффициентов:

$$w_1 = (0{,}418;0{,}540;0{,}666),$$
$$w_2 = (0{,}135;0{,}163;0{,}201),$$
$$w_3 = (0{,}199;0{,}297;0{,}382).$$

Проводя вычисления, аналогичные вышеприведенным, имеем расчетную матрицу попарных сравнений $\check{C}_2$:

$$\check{C}_2 = \begin{pmatrix} (1;1;1) & (2{,}080;3{,}313;4{,}933) & (1{,}094;1{,}818;3{,}347) \\ (0{,}203;0{,}302;0{,}481) & (1;1;1) & (0{,}353;0{,}549;1{,}010) \\ (0{,}299;0{,}550;0{,}914) & (0{,}990;1{,}822;2{,}830) & (1;1;1) \end{pmatrix}.$$

Расчеты показывают, что интегральная абсолютная ошибка между матрицами $\check{C}$ и $\check{C}_2$ равна $\rho_4 = 3$. Таким образом, предложенный метод в 2,38 раза точнее метода LLSM.

Заключение

Разработан новый метод расчета треугольных весовых коэффициентов, основанный на параметрическом представлении треугольного числа и использовании методов нелинейного математического программирования. Точность предложенного метода определена методом сравнения с известным методом LLSM на двух тестовых матрицах, заимствованных из литературных источников. Расчеты показали, что интегральная абсолютная ошибка предложенного метода более чем в два раза меньше, чем у метода LLSM.

Таким образом, при использовании предложенного метода получены треугольные весовые коэффициенты с повышенной точностью, что позволяет повысить достоверность и обоснованность решения многокритериальных задач в различных областях экономики, горноспасательного дела, пожарной безопасности, оценке рисков чрезвычайных ситуаций и др.

Список источников

1. Артамонов В.С., Лабинский А.Ю., Уткин О.В. Модернизация нечеткого метода анализа иерархии // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2016. № 4. С. 77–84.

2. Chang D.Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP // European Journal of Operational Research. 1996. Vol. 95. P. 649–655.

3. Ying-Ming Wang, Ying Luo, Zhongsheng Hua. On the extent analysis method for fuzzy AHP and its applications // European Journal of Operational Research. 2008. Vol. 186. P. 735–747.

4. Tsvetinov P., Mikhailov L. Reasoning Under Uncertainty During Pre-Negotiations Using a Fuzzy AHP // Applied soft computing. 2004. Vol. 5. P. 23–33.

5. Дубровин В.И., Миронова Н.А. Метод получения вектора приоритетов из нечетких матриц попарных сравнений // Искусственный интеллект. 2009. № 3. С. 77–84.

6. Cheng R.W., Che Wei Chang, Hung-Lung Lin. A fuzzy ANP-based approach to evaluate medical organization performance // International Journal of Information and Management Sciences. 2008. Vol. 19. № 1. P. 53–74.

7. Liao S.H., Lu K.C., Cheng C.H. Evaluating anti-armor weapon using rankin fuzzy numbers // Tamsui Oxford Journal of Mathematical Sciences. 2000. Vol. 16. № 2. P. 241–257.

8. Prabjot K.A., Mahanti N.C. Fuzzy ANP-based approach for selection ERP vendors // International Journal of Soft Computing. 2008. Vol. 10. № 2. P. 241–257.

9. Xinfan W. Fuzzy Number Intuitionistic Fuzzy Arithmetic Aggregation Operators // International Journal of Fuzzy Systems. 2008. Vol. 10. № 2. P. 92–103.

10. Ting-Yu Chen, Tai-Chun Ku. Importance-Assessing Method with Fuzzy Number-Valued Fuzzy Measures and Discussions on TFNs And TrFNs // International Journal of Fuzzy Systems. 2008. Vol. 10. № 2. P. 104–111.

11. Тоха Х.А. Введение в исследование операций. 7-е изд. М.: Вильямс, 2005. С. 912.

12. Скороход А.Б. Применение нечеткого метода анализа иерархий в задаче оценки конкурентных позиций предприятия // Экономика и управление. 2011. № 5. С. 104–110.

References

1. Artamonov V.S., Labinskij A.Yu., Utkin O.V. Modernizaciya nechetkogo metoda analiza ierarhii // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2016. № 4. S. 77–84.

2. Chang D.Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP // European Journal of Operational Research. 1996. Vol. 95. P. 649–655.

3. Ying-Ming Wang, Ying Luo, Zhongsheng Hua. On the extent analysis method for fuzzy AHP and its applications // European Journal of Operational Research. 2008. Vol. 186. P. 735–747.

4. Tsvetinov P., Mikhailov L. Reasoning Under Uncertainty During Pre-Negotiations Using a Fuzzy AHP // Applied soft computing. 2004. Vol. 5. P. 23–33.

5. Dubrovin V.I., Mironova N.A. Metod polucheniya vektora prioritetov iz nechetkih matric poparnyh sravnenij // Iskusstvennyj intellekt. 2009. № 3. S. 77–84.

6. Cheng R.W., Che Wei Chang, Hung-Lung Lin. A fuzzy ANP-based approach to evaluate medical organization performance // International Journal of Information and Management Sciences. 2008. Vol. 19. № 1. P. 53–74.

7. Liao S.H., Lu K.C., Cheng C.H. Evaluating anti-armor weapon using rankin fuzzy numbers // Tamsui Oxford Journal of Mathematical Sciences. 2000. Vol. 16. № 2. P. 241–257.

8. Prabjot K.A., Mahanti N.C. Fuzzy ANP-based approach for selection ERP vendors // International Journal of Soft Computing. 2008. Vol. 10. № 2. P. 241–257.

9. Xinfan W. Fuzzy Number Intuitionistic Fuzzy Arithmetic Aggregation Operators // International Journal of Fuzzy Systems. 2008. Vol. 10. № 2. P. 92–103.

10. Ting-Yu Chen, Tai-Chun Ku. Importance-Assessing Method with Fuzzy Number-Valued Fuzzy Measures and Discussions on TFNs And TrFNs // International Journal of Fuzzy Systems. 2008. Vol. 10. № 2. P. 104–111.

11. Toha H.A. Vvedenie v issledovanie operacij. 7-e izd. M.: Vil'yams, 2005. C. 912.

12. Skorohod A.B. Primenenie nechetkogo metoda analiza ierarhij v zadache ocenki konkurentnyh pozicij predpriyatiya // Ekonomika i upravlenie. 2011. № 5. C. 104–110.

Информация о статье:
Статья поступила в редакцию: 14.08.2023; одобрена после рецензирования: 15.09.2023;
принята к публикации: 17.09.2023

The information about article:
The article was submitted to the editorial office: 14.08.2023; approved after review: 15.09.2023;
accepted for publication: 17.09.2023

Информация об авторах:
Пефтибай Георгий Иванович, начальник научно-исследовательского отдела специальных средств ведения аварийно-спасательных работ Научно-исследовательского института «Респиратор» МЧС Донецкой Народной Республики (283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 157), кандидат технических наук, e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru, SPIN-код: 6982-0099
Галухин Николай Александрович, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела специальных средств ведения аварийно-спасательных работ Научно-исследовательского института «Респиратор» МЧС Донецкой Народной Республики (283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 157), e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru, SPIN-код: 6004-0555
Ивахненко Андрей Викторович, инженер II категории научно-исследовательского отдела специальных средств ведения аварийно-спасательных работ Научно-исследовательского института «Респиратор» МЧС Донецкой Народной Республики (283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 157), e-mail: andrey_ivahnenko@mail.ru

Information about authors:
Peftibai Georgy I., head of the research department of special means of conducting emergency rescue operations of the Scientific research institute «Respirator» of EMERCOM of the Donetsk People's Republic (283048, Donetsk, Artem str., 157), candidate of technical sciences, e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru, SPIN: 6982-0099
Galukhin Nikolay A., senior researcher of the research department of special means of conducting emergency rescue operations of the Scientific research institute «Respirator» of EMERCOM of the Donetsk People's Republic (283048, Donetsk, Artem str., 157), e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru, SPIN: 6004-0555
Ivakhnenko Andrey V., engineer of the II category of the research department of special means of conducting emergency rescue operations of the Scientific research institute «Respirator» of EMERCOM of the Donetsk People's Republic (283048, Donetsk, Artem str., 157), e-mail: andrey_ivahnenko@mail.ru