



Научная статья

УДК 620.92:519.816

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-451-464>

Многокритериальный выбор структуры генерирующих мощностей локальных энергосистем на основе модифицированного метода анализа иерархий

Александр Сергеевич Нефедов^{1✉}, Владислав Альбертович Шакиров²,
Светлана Михайловна Игнатьева³

^{1,3}Братский государственный университет, г. Братск, Россия

²Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

¹domino1991@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5507-2798>

²mynovember@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>

³Smignateva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5179-1680>

Резюме. Цель – представить модификацию метода анализа иерархий для повышения его эффективности при использовании в задачах многокритериального сравнения структур генерирующих мощностей локальных энергорайонов при их развитии. В работе рассматривается многокритериальная задача выбора наиболее перспективного соотношения установленных мощностей электростанций, входящих в состав единой структуры генерирующих мощностей при развитии локального энергорайона Хабаровского края. В роли энергоисточников выступают тепловая, солнечная, ветровая и дизельная электростанции. В качестве критериев оценки альтернативных вариантов были приняты следующие: нормированная стоимость электроэнергии, оценка экологической эффективности; оценка общественного мнения о последствиях, связанных со строительством электростанций. Для решения многокритериальной задачи предложено использовать метод анализа иерархий. При рассмотрении применения оригинального метода анализа иерархий для решения поставленной задачи установлено, что реализация этапа парных сравнений альтернатив при их большом количестве представляет ощутимую нагрузку на лицо, принимающее решение. Так, уже при оценке 10 альтернатив по 5 критериям лицу, принимающему решение, необходимо провести 225 парных сравнений, что в итоге может дать неприемлемый индекс согласованности результатов. Кроме этого, необходима процедура, направленная на учет неопределенности предпочтений лица, принимающего решения. В качестве решения предложена методика заполнения матриц парных сравнений альтернатив по критериям, которая заключается в построении интервальной или нечеткой модели предпочтений лица, принимающего решения, в отношении пар оценок по критерию. В качестве апробации предложенной методики приводится численный пример решения поставленной задачи. Получен наилучший вариант энергоструктуры, состоящей из электростанций: тепловой – 30 МВт, солнечной – 35 МВт, дизельной – 39 МВт. Предложенная методика обеспечивает высокую согласованность результатов парных сравнений альтернатив. Кроме этого, использование модифицированного метода анализа иерархий позволяет учитывать нелинейный характер предпочтений лица, принимающего решения, относительно оценок альтернатив по критериям.

Ключевые слова: изолированная энергосистема, структура генерирующих мощностей, метод анализа иерархий, матрица парных сравнений, модель предпочтений

Благодарности: Исследование выполнено в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0004, рег. № АААА-А21-121012090010-7) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (проект № 13.ЦКП.21.0038).

Для цитирования: Нефедов А. С., Шакиров В. А., Игнатьева С. М. Многокритериальный выбор структуры генерирующих мощностей локальных энергосистем на основе модифицированного метода анализа иерархий // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 451–464. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-451-464>.

Multi-criteria selection of the mix of generating plants in local energy systems based on a modified analytic hierarchy process

Aleksandr S. Nefedov^{1✉}, Vladislav A. Shakirov², Svetlana M. Ignatieva³

^{1,3}Bratsk State University, Bratsk, Russia

²Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

¹domino1991@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5507-2798>

²mynovember@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>

³Smignateva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5179-1680>

Abstract. This paper presents a modification of the analytic hierarchy process in order to increase its efficiency for a multi-criteria comparison of mixes of generating plants in local energy areas during their development. The multi-criteria problem of selecting the most effective ratio of rated capacities is considered for power plants representing a single mix of generating plants during the development of a local energy area in the Khabarovsk Krai. The energy sources are represented by thermal, solar, wind and diesel power plants. The following estimation criteria for alternative solutions were accepted: leveled cost of electricity, ecological efficiency estimation; estimation of public opinion about the consequences involved with the establishment of power plants. In order to solve the multi-criteria problem, the analytic hierarchy process (AHP) was used. When using the original AHP for the set problem, a large quantity of alternatives at the stage of pairwise comparisons were found to represent a perceptible load on a decision maker. Thus, already during the estimation of 10 alternatives according to 5 criteria, decision makers should conduct 225 pairwise comparisons, which may eventually result in an unacceptable consistency of the results. In addition, this requires a procedure accounting for the uncertainty of the decision maker's preferences. The proposed solution represents a method of forming matrices of pairwise comparisons upon criteria. This method consists in generating an interval or fuzzy model of the decision maker's preferences for evaluating pairs of estimates according to the criterion. The proposed method was verified using a numerical example of solving the set problem. The obtained optimum mix of power plants consists of thermal, solar and diesel plants with a power of 30, 35 and 39 mW, respectively. The proposed method ensures a high consistency of the results obtained during alternative pairwise comparisons. In addition, the modified analytic hierarchy process takes into account the non-linear nature of the decision maker's preferences for estimating alternatives according to criteria.

Keywords: isolated power grid, generating capacity structure, analytic hierarchy process, pairwise comparison matrix, preference model

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the project of the state assignment (No. FWEU-2021-0004, reg. no. AAAA-A21-121012090010-7) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period from 2021 to 2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (project no. 13.ЦКП.21.0038).

For citation: Nefedov A. S., Shakirov V. A., Ignatieva S. M. Multi-criteria selection of the mix of generating plants in local energy systems based on a modified analytic hierarchy process. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):451-464. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-451-464>.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно энергетической стратегии России, на период до 2035 г. повышение устойчивости и надежности энергоснабжения макрорегионов будет осуществляться с максимальным экономически эффективным использованием местных энергетических ресурсов, возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и распределенной генерации⁴. Большая роль отводится ВИЭ и местным энергоресурсам в решении задач освоения удаленных и изолированных районов [1, 2].

Одной из ключевых задач при развитии

локальных энергосистем в удаленных районах является определение перспективной структуры генерирующих мощностей (СГМ) – состава и установленной мощности электростанций. Эта задача усложнена как большим числом возможных альтернатив, так и высокой неопределенностью условий дальнейшего развития удаленного района.

В зарубежных исследованиях при решении задач планирования развития энергетики районов и регионов широкое распространение получили методы многокритериального выбора, такие как метод анализа иерархий

АНР (от англ. Analytic Hierarchy Process) [3], ELECTRE, метод многокритериальной теории полезности MAUT (от англ. Multy Attribute Utility Theory), PROMETHEE, TOPSIS, UTA (от англ. Utilities Additives) и др. Для многокритериального выбора СГМ во многих исследованиях использовался АНР [4]. В исследовании [5] АНР применялся для многокритериального сравнения последствий реализации сценариев с переходом к различным СГМ в перспективе до 2050 г. с позиций экономических, экологических, технических и социальных критериев. В работе [6] с помощью АНР выполнено многокритериальное сравнение различных структур локальных энергосистем с ВИЭ, формирование которых проводилось в программе HOMER. В исследовании [7] с помощью АНР осуществлялась многокритериальная оценка различных вариантов электроснабжения удаленных районов с рассмотрением в качестве альтернатив дизельной генерации и различных видов ВИЭ.

Широкому использованию АНР способствовала его реализация в виде программного обеспечения [7, 8], а также следующие достоинства [9]:

- универсальность метода, простота расчетов рейтингов альтернатив, удобство парных сравнений для выявления предпочтений лица, принимающего решения (ЛПР);
- возможность обобщения мнений нескольких экспертов, работающих независимо друг от друга над локальными задачами [9];
- возможность сравнения альтернатив как с качественным, так и с количественным описанием оценок по критериям;
- широкие возможности выявления противоречий в предпочтениях ЛПР с помощью процедуры определения индекса согласованности суждений.

Недостатки и ограничения АНР [10]:

- проблема согласованности суждений, а также увеличение трудоемкости метода в задачах с количеством критериев или альтернатив более семи;

– проблема Rank reversal – изменение ранжирования альтернатив при добавлении или удалении новых;

– проблема учета неопределенности исходной информации и предпочтений ЛПР.

Для преодоления ограничений классического АНР исследователями были представлены различные модификации метода или теоретические обоснования допустимости указанных недостатков [11]. Так, был предложен мультипликативный метод анализа иерархий, который не имеет проблемы rank reversal в подавляющем большинстве случаев [12]. Также были предложены подходы к снижению числа запросов к ЛПР [13]. В зарубежных исследованиях получили распространение модификации нечеткого АНР, позволяющего учесть неопределенность исходной информации и предпочтений [14–16].

В работе [17] авторами была предложена модификация метода АНР, направленная на снижение числа запросов при проведении парных сравнений альтернатив по критериям. Такая модификация обеспечивает возможность применения АНР к задачам с большим числом альтернатив. В данной статье предлагается дальнейшее развитие этой модификации АНР в направлении возможности учета неопределенностью предпочтений ЛПР.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ КЛАССИЧЕСКОГО МЕТОДА ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

Суть метода анализа иерархий состоит в диалоговой работе с ЛПР, в ходе которой многокритериальная задача представляется в виде иерархической структуры цель–критерии–альтернативы. На следующем этапе при помощи ЛПР проводится реализация парных сравнений альтернатив и критериев с использованием шкалы сравнительной важности (табл. 1)⁵.

В результате попарного сравнения альтернатив по критериям формируются матрицы парных сравнений с оценками $C_{11} \dots C_{mm}$

⁴Об Энергетической стратегии РФ на период до 2030 г. (документ утратил силу). Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009. № 1715-р.

⁵Петровский А. Б. Теория принятия решений: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М.: ИЦ «Академия», 2009. 400 с.

Таблица 1. Фундаментальная шкала для оценки силы суждений⁵**Table 1.** Fundamental assessment scale for judgment strength⁵

Степень важности	Оценка сравнительной важности элемента иерархии
Равная важность	1
Умеренное превосходство	3
Существенное превосходство	5
Большое превосходство	7
Абсолютное превосходство	9

(табл. 2)⁵. Аналогично формируется матрица парных сравнений критериев. Данные матрицы являются обратно симметричными.

Таблица 2. Матрица парных сравнений альтернатив⁵
Table 2. Pairwise comparison matrix of alternatives⁵

Альтернатива	A ₁	...	A _j	...	A _m
A ₁	1	...	c _{1j}	...	c _{1m}
...	...	...	...	...	...
A _i	c _{i1}	...	c _{ij}	...	c _{im}
...	...	...	...	...	...
A _m	c _{m1}	...	c _{mj}	...	1

Далее осуществляется свертка локальных приоритетов⁵:

$$v_i = d_i / \sum_{i=1}^m d_i, \quad (1)$$

где d_i – элемент собственного вектора матрицы, соответствующий критерию или альтернативе.

Элемент собственного вектора матрицы, например, парных сравнений альтернатив⁵:

$$d_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m c_{ij}}, \quad (2)$$

где m – количество альтернатив; c_{ij} – оценка пары альтернатив i и j .

На заключительном этапе определяется глобальный приоритет для каждой альтернативы:

$$V_j = \sum_{i=1}^n w_i v_{ij}, \quad (3)$$

где V_j – показатель важности j -й альтернативы; n – количество критериев; w_i – вес i -го критерия; v_{ij} – вес j -й альтернативы по i -му критерию.

Альтернатива с максимальным глобальным приоритетом считается лучшим решением.

Процедура АНР располагает встроенным критерием проверки качества заполнения матриц парных сравнений – индексом согласованности, который дает информацию о степени нарушения согласованности экспертных суждений и определяется как⁵

$$I_h = \frac{\lambda_h^{\max} - h}{h - 1}, \quad (4)$$

где $\lambda_h^{\max}$ – собственный вектор матрицы; h – размерность матрицы парных сравнений.

Индекс согласованности сравнивается с индексом средней согласованности I_h^{cp} , значения которого приведены в табл. 3.

$$R_h = \frac{I_h}{I_h^{cp}}. \quad (5)$$

Таблица 3. Индекс средней согласованности для случайных матриц разного порядка**Table 3.** Average consistency index for random matrices of different order

h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_h^{cp}	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Если $R_h \leq 0,1 \div 0,15$ (10÷15%), то уровень согласованности является приемлемым, в противном случае необходимо вернуться к опросу ЛПР и скорректировать элементы матриц парных сравнений.

Количество запросов к ЛПР при парных сравнениях альтернатив и критериев определяется зависимостью:

$$Q = \left(\frac{m^2}{2} - \frac{m}{2} \right) \cdot n. \quad (6)$$

Исходя из данной зависимости, уже при многокритериальном выборе из 10 альтернатив с учетом 5 критериев ЛПР необходимо

будет провести 225 парных сравнений, что достаточно трудоемко и может зачастую дать неприемлемый индекс согласованности. Поэтому для возможности применения АНР к задачам с большим числом альтернатив и критериев в статье [17] была предложена модификация метода. На этапе парных сравнений альтернатив предложена диалоговая процедура, направленная на построение модели предпочтений ЛПР, которая далее замещает ЛПР. В задачах с большим горизонтом планирования ЛПР затруднительно точно выражать свои предпочтения. Поэтому предлагается дальнейшее развитие предложенной в [17] модификации АНР, направленное на формирование интервальной или нечеткой модели предпочтений.

МЕТОДИКА ЗАПОЛНЕНИЯ МАТРИЦ ПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ АЛЬТЕРНАТИВ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ЛИЦА, ПРИНИМАЮЩЕГО РЕШЕНИЯ

Данная методика базируется на исследовании, проведенном авторами в работе [17].

В основе предлагаемой модификации метода АНР лежит методика, направленная на построение интервальной или нечеткой «модели предпочтений ЛПР в отношении пар оценок по критериям». Модель учитывает различную ценность для ЛПР оценок по критериям в начале и конце их диапазона. Рассмотрим основные этапы предлагаемой методики.

Предположим, что альтернативы оценены по какому-либо критерию и диапазон оценок варьируется от x_a до x_b . Цель диалоговой процедуры – заполнить матрицу парных сравнений (см. табл. 2), элемент которой определяется как [17]

$$c(x_i, x_j) = \frac{s(x_i)}{s(x_j)}, \quad (7)$$

где $s(x_i)$, $s(x_j)$ – соответственно, показатель сравнительной важности оценки x_i и x_j в отношении x_a [17].

Шаг 1: формируется модель предпочтений ЛПР на основе шкалы (см. табл. 1) и следующих вопросов:

Оценки альтернатив по критерию изменяются от x_a до x_b [17]. При этом оценка x_b превосходит оценку x_a с оценкой 9 по шкале (см. табл. 1). Пусть имеется альтернатива с оценкой x_a . Какая оценка альтернативы в интервале $[x'_{aL}; x'_{aR}]$ могла бы соответствовать оценке 3 по шкале (см. табл. 1) «умеренное превосходство» по отношению к x_a ? Ответ ЛПР формирует интервал $[\Delta x_{1L}^3; \Delta x_{1R}^3] = [x'_{aL}; x'_{aR}] - x_a$. Ответ ЛПР может быть представлен и в виде нечеткой треугольной оценки $[x'_{aL}; x'_{aC}; x'_{aR}]$, где x'_{aC} – наиболее вероятное значение.

Пусть имеется альтернатива с оценкой x_b . Назовите оценку в интервале $[x'_{bL}; x'_{bR}]$, по отношению к которой оценка x_b могла бы характеризоваться оценкой «3»? Ответ ЛПР определяет $[\Delta x_{2L}^3; \Delta x_{2R}^3] = [x'_{bL}; x'_{bR}] - x_a$. Вторым вопросом позволяет проверить корректность суждений ЛПР относительно шкалы сравнительной важности (см. табл. 1) [17]. Если $[x'_{aL}; x'_{aR}]$ в сравнении с x_a дает оценку «3» по шкале (см. табл. 1), то x_b при сравнении с $[x'_{aL}; x'_{aR}]$ должна также давать «3», так как x_b в сравнении с x_a дает оценку «9» (см. табл. 1). Если имеется разница между $[\Delta x_{1L}^3; \Delta x_{1R}^3]$ и $[\Delta x_{2L}^3; \Delta x_{2R}^3]$, это означает, что ЛПР неточно выражает свои предпочтения. Ошибка суждений определяется в виде разности между $[\Delta x_{1L}^3; \Delta x_{1R}^3]$ и $[\Delta x_{2L}^3; \Delta x_{2R}^3]$. После определения предпочтений ЛПР относительно оценки «3» дальнейшая процедура заполнения матриц парных сравнений осуществляется без участия ЛПР.

Шаг 2: Заполнение матрицы парных сравнений альтернатив по критерию. Интервальные предпочтения, соответствующие оценкам «5», «7», «9» (см. табл. 1) определяются при помощи системы уравнений:

$$\begin{cases} x^1 = x_a \\ x_{L,R}^3 = x^1 + \Delta x_{L,R}^3 \\ x_{L,R}^5 = x_{L,R}^3 + \Delta x_{L,R}^3 t \\ x_{L,R}^7 = x_{L,R}^5 + \Delta x_{L,R}^3 t^2 \\ x^9 = x_{L,R}^7 + \Delta x_{L,R}^3 t^3 = x_b \end{cases}, \quad (8)$$

где $x_{L,R}$ – определяемые предпочтения ЛПР относительно оценок сравнительной важности

сти (см. табл. 1), соответствующие нижней L и верхней R границам интервальных предпочтений ЛПР.

В результате может быть получена модель предпочтений ЛПР относительно изменения оценок альтернатив по критерию. На рис. 1 представлена модель предпочтений ЛПР, построенная на основе ответов ЛПР в виде нечетких треугольных чисел.

Шаг 3. По зависимости (см. рис. 1.) для любой альтернативы с оценкой x_i можно

определить оценки сравнительной важности $s_L(x_i)$, $s_C(x_i)$, $s_R(x_i)$, и при помощи формулы (7) заполнить матрицу парных сравнений, которая будет выглядеть следующим образом (табл. 4).

Шаг 4: После реализации парных сравнений при помощи методики оригинального АНР можно определить 3 набора локальных коэффициентов важности альтернатив по критериям (табл. 5).

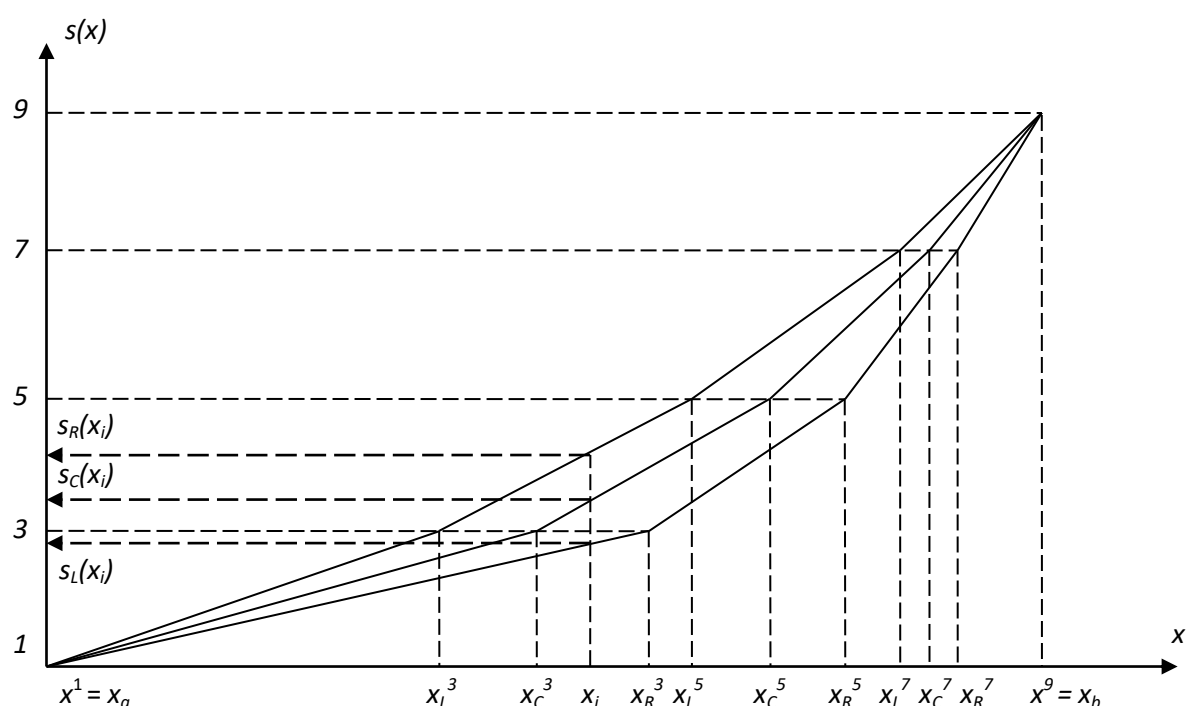


Рис. 1. Зависимость оценок сравнительной важности для нижней, средней и верхней границ ответа лица, принимающего решения, при возрастающих предпочтениях
Fig. 1. Dependence of comparative importance estimates for the lower, middle and upper boundaries of the decision maker's response under increasing preferences

Таблица 4. Матрица парных сравнений альтернатив по критерию при нечетких предпочтениях лица, принимающего решения

Table 4. Pairwise comparison matrix of alternatives by the criterion with fuzzy preferences of the decision maker

Альтернатива	A_1	A_2	...	A_m
A_1	1	$s_L(x_1)/s_L(x_2)$ $c_{12} = s_C(x_1)/s_C(x_2)$ $s_R(x_1)/s_R(x_2)$	...	$s_L(x_1)/s_L(x_m)$ $c_{1m} = s_C(x_1)/s_C(x_m)$ $s_R(x_1)/s_R(x_m)$
A_2	$s_L(x_2)/s_L(x_1)$ $c_{21} = s_C(x_2)/s_C(x_1)$ $s_R(x_2)/s_R(x_1)$	1	...	$s_L(x_2)/s_L(x_m)$ $c_{2m} = s_C(x_2)/s_C(x_m)$ $s_R(x_2)/s_R(x_m)$
...	...	...	1	...
A_m	$s_L(x_m)/s_L(x_1)$ $c_{m1} = s_C(x_m)/s_C(x_1)$ $s_R(x_m)/s_R(x_1)$	$s_L(x_m)/s_L(x_2)$ $c_{m2} = s_C(x_m)/s_C(x_2)$ $s_R(x_m)/s_R(x_2)$	...	1

Таблица 5. Набор локальных коэффициентов важности альтернатив для n критериев при неопределенности предпочтений лица, принимающего решения

Table 5. A set of local coefficients of alternative importance for n criteria with uncertainty of the decision maker's preferences

Критерий	Локальные коэффициенты важности для m альтернатив		
	левая граница	среднее значение	правая граница
K_1	$V_{1L} = \{V_{11L}, V_{12L}, \dots, V_{1mL}\}$	$= \{V_{11C}, V_{12C}, \dots, V_{1mC}\}$	$V_{1R} = \{V_{11R}, V_{12R}, \dots, V_{1mR}\}$
K_2	$V_{2L} = \{V_{21L}, V_{22L}, \dots, V_{2mL}\}$	$V_{2C} = \{V_{21C}, V_{22C}, \dots, V_{2mC}\}$	$V_{2R} = \{V_{21R}, V_{22R}, \dots, V_{2mR}\}$
...	...	...	...
K_n	$V_{nL} = \{V_{n1L}, V_{n2L}, \dots, V_{nmL}\}$	$V_{nC} = \{V_{n1C}, V_{n2C}, \dots, V_{nmC}\}$	$V_{nR} = \{V_{n1R}, V_{n2R}, \dots, V_{nmR}\}$

На основе наборов локальных коэффициентов важности (см. табл. 5) может быть получен набор итоговых глобальных приоритетов для каждой из альтернатив, который имеет вид (табл. 6).

Таблица 6. Набор глобальных приоритетов альтернативы x_i

Table 6. A set of global priorities for x_i alternative

Вариант предпочтений	Глобальные приоритеты альтернативы x_i
1	$V_{i1} = V_{1iL}W_1 + V_{2iL}W_2 + \dots + V_{niL}W_n$
2	$V_{i2} = V_{1iL}W_1 + V_{2iL}W_2 + \dots + V_{niL}W_n$
3	$V_{i3} = V_{1iL}W_1 + V_{2iL}W_2 + \dots + V_{niL}W_n$
...	...
z	$V_{iz} = V_{1iL}W_1 + V_{2iL}W_2 + \dots + V_{niL}W_n$

Каждый вариант предпочтений ЛПР z определяет соответствующее ранжирование альтернатив. Лучшей признается альтернатива, которая имеет высший ранг при большем числе вариантов предпочтений ЛПР:

$$P_i = \frac{z_i}{z}, \quad (9)$$

где z_i – число вариантов предпочтений, при котором альтернатива i имела высший ранг.

Также могут быть получены средние и граничные многокритериальные оценки альтернатив с учетом всех вариантов предпочтений ЛПР:

$$V_{iC} = \frac{\sum_{k=1}^z V_{ik}}{z}; \quad (10)$$

$$V_{iL} = \min(V_{ik}), k = 1 \dots z; \quad (11)$$

$$V_{iR} = \max(V_{ik}), k = 1 \dots z. \quad (12)$$

Полученные оценки для каждой альтернативы позволяют установить возможные их отклонения в связи с неопределенностью предпочтений ЛПР.

АПРОБАЦИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ANALYTIC HIERARCHY PROCESS ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ВЫБОРА СТРУКТУРЫ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ В УДАЛЕННОМ РАЙОНЕ

Применение методики заполнения матриц парных сравнений альтернатив предлагается рассмотреть на примере задачи многокритериального выбора СГМ в удаленном районе. Рассматриваются следующие виды электростанций в рамках СГМ: тепловая электростанция (ТЭС), солнечная электростанция (СЭС), ветровая электростанция (ВЭС), дизельная электростанция (ДЭС). Каждая из электростанций, входящих в СГМ, имеет свои преимущества и недостатки, поэтому перед специалистами возникает задача, целью которой является выбор наиболее рационального соотношения генерирующих мощностей электростанций, входящих в единую СГМ с позиций многих критериев [18, 19].

Оценка различных вариантов СГМ проводится с использованием следующих критериев:

- K_1 – нормированная стоимость электроэнергии за период эксплуатации СГМ сроком 25 лет, руб/кВт·ч;
- K_2 – оценка экологической эффективности СГМ в ходе жизненного цикла, балл;
- K_3 – оценка общественного мнения о последствиях, связанных со строительством

электростанций, входящих в СГМ, балл.

Наиболее высокие значения оценок СГМ по критериям K_1 и K_2 соответствуют менее предпочтительным вариантам, а по критерию K_3 – более предпочтительным.

Исходные данные об оценках альтернатив предлагается принять на основе исследований развития удаленного района Хабаровского края [20], которые имеют следующие показатели (табл. 7).

Итак, предположим, что ЛПР после ознакомления с оценками СГМ по критериям (при реализации диалоговой процедуры выявления предпочтений) руководствовался следующими положениями:

- по критерию K_1 «Нормированная стоимость электроэнергии» важной для ЛПР является граница 8 руб/кВт·ч. Превышение этой границы повышает риски неэффективного функционирования электростанций, входящих в СГМ;

- по критерию K_2 «Экологическая эффективность» для ЛПР превышение 40 баллов соответствует вариантам с чрезмерным влиянием на экологию района размещения электростанций, входящих в СГМ;

- по критерию K_3 предпочтения для ЛПР имеют линейный характер.

Рассмотрим процесс формирования предпочтений ЛПР:

Критерий K_1 : оценки альтернатив изменя-

ются от 5,8 до 12,7 руб/кВт·ч. Пусть имеется альтернатива с оценкой 12,7 руб/кВт·ч. Какая оценка альтернативы даст «умеренное превосходство с оценкой 3» (см. табл. 1) по отношению к оценке 12,7 руб/кВт·ч? Ответ ЛПР: [11,7; 11,95; 12,2] руб/кВт·ч.

Критерий K_2 : оценки альтернатив изменяются от 32,2 до 52,6 балла. Пусть имеется альтернатива с оценкой 52,6 балла. Какая оценка альтернативы даст «умеренное превосходство с оценкой 3» (см. табл. 1) по отношению к оценке 52,6 балла? Ответ: [50; 50,5; 51] балл.

Предпочтения ЛПР относительно критерия K_3 имеют линейный характер.

В результате ответов формируется модель предпочтений ЛПР (табл. 8, рис. 2).

На основе полученных зависимостей становится возможным заполнить матрицы парных сравнений при помощи формул (7) и (8). В табл. 9 представлен пример для критерия K_1 – «Нормированная стоимость электроэнергии». Заполнение матриц парных сравнений осуществляется автоматически без участия ЛПР. Процедура обеспечивает идеальную согласованность с оценкой $R_h = 0$.

На основе заполненных аналогичным образом матриц парных сравнений для остальных критериев при помощи формулы (1) был получен набор локальных приоритетов альтернатив (табл. 10).

Таблица 7. Оценки альтернативных вариантов структуры генерирующих мощностей по критериям

Table 7. Estimates of alternative variants of the generating capacity structure by criteria

Альтернатива	Установленная мощность, МВт				K_1 , руб/кВт·ч	K_2 , балл	K_3 , балл
	ТЭС	СЭС	ВЭС	ДЭС			
A_1	40	20	0	29	5,84	52,64	1,45
A_2	30	35	0	39	7,75	45,81	1,78
A_3	30	0	70	39	8,56	50,32	1,34
A_4	30	30	30	39	7,97	47,40	1,71
A_5	20	45	0	49	9,73	39,05	2,06
A_6	20	0	70	49	10,66	42,35	1,56
A_7	20	30	30	49	10,08	40,25	1,91
A_8	10	60	0	59	11,64	32,22	2,38
A_9	10	0	70	59	12,76	34,37	1,78
A_{10}	10	30	30	59	12,17	33,11	2,11

Примечания: ТЭС – тепловая электростанция; СЭС – солнечная электростанция; ВЭС – ветровая электростанция; ДЭС – дизельная электростанция.

Таблица 8. Предпочтения лица, принимающего решения, относительно критериев
 Table 8. Decision maker's preferences regarding the criteria

Границы предпочтений лица, принимающего решения	Критерии		
	K_1 , руб/кВт·ч	K_2 , балл	K_3 , балл
Δx_L^3	0,5	1,5	0,26
Δx_C^3	0,75	2	
Δx_R^3	1	2,5	

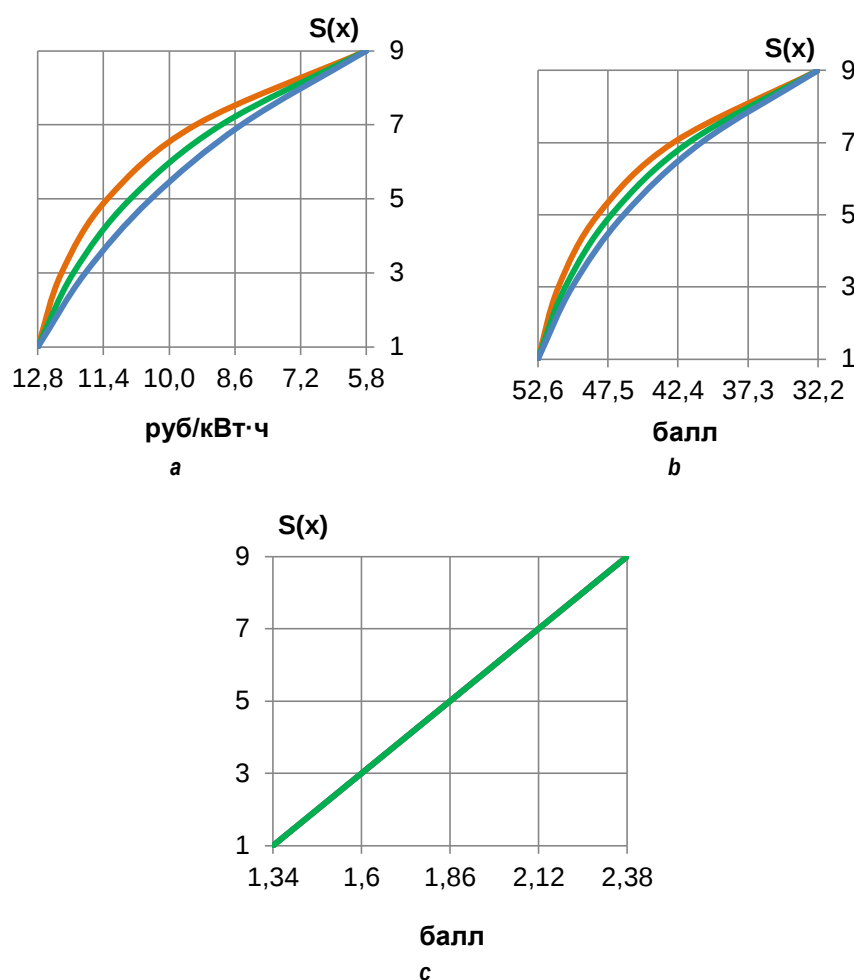


Рис. 2. Зависимости оценок сравнительной важности от оценок альтернатив по критериям: а – «Нормированная стоимость электроэнергии»; б – «Экологическая эффективность»; с – «Оценка общественного мнения»
 Fig. 2. Dependences of the estimates of comparative importance on alternative assessments by criteria:
 а – “Levelized cost of electrical energy”; б – “Environmental efficiency”; с – “Public opinion assessment”

Оценка сравнительной важности критериев проводится по оригинальной методике АНР на основе формул (1) и (2). В табл. 11 представлена матрица парных сравнений критериев и полученные локальные приоритеты критериев. I_h матрицы парных сравнений составил 0,0011, а отношение согласованности R_h составило 0,18%, что является приемлемым результатом.

На основе локальных приоритетов (см.

табл. 10, 11) формируется набор итоговых ранжировок альтернатив $LLL - RRR$, где L, C, R соответствуют левой, средней и правой границам локальных приоритетов альтернатив по критериям V_L, V_C, V_R , используемых для определения глобальных приоритетов альтернатив (табл. 12). Показатели для 5 наиболее эффективных альтернатив представлены в табл. 12.

Таблица 9. Матрица парных сравнений альтернатив по критерию K_1
Table 9. Pairwise comparison matrix of alternatives by the K_1 criterion

K_1	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}
A_1	1	1,13 1,16 1,19	1,20 1,25 1,30	1,15 1,18 1,22	1,35 1,47 1,59	1,59 1,75 1,96	1,43 1,56 1,69	2,11 2,49 2,84	9,00 9,00 9,00	2,83 3,52 4,15
A_2	0,88 0,86 0,84	1	1,06 1,07 1,09	1,02 1,02 1,02	1,19 1,26 1,33	1,40 1,50 1,65	1,26 1,34 1,42	1,86 2,15 2,38	7,93 7,75 7,54	2,50 3,03 3,48
A_3	0,83 0,80 0,77	0,94 0,93 0,91	1	0,96 0,95 0,94	1,12 1,18 1,22	1,32 1,40 1,51	1,19 1,25 1,30	1,75 2,00 2,18	7,48 7,22 6,90	2,36 2,82 3,18
A_4	0,87 0,84 0,82	0,98 0,98 0,98	1,04 1,05 1,07	1	1,17 1,24 1,30	1,38 1,48 1,61	1,24 1,32 1,39	1,83 2,11 2,33	7,81 7,60 7,38	2,46 2,97 3,40
A_5	0,74 0,68 0,63	0,84 0,79 0,75	0,89 0,85 0,82	0,85 0,81 0,77	1	1,18 1,19 1,24	1,06 1,06 1,07	1,56 1,70 1,79	6,68 6,13 5,68	2,10 2,39 2,62
A_6	0,63 0,57 0,51	0,72 0,67 0,61	0,76 0,71 0,66	0,73 0,68 0,62	0,85 0,84 0,81	1	0,90 0,89 0,86	1,33 1,43 1,45	5,68 5,15 4,59	1,79 2,01 2,11
A_7	0,70 0,64 0,59	0,79 0,74 0,70	0,84 0,80 0,77	0,81 0,76 0,72	0,94 0,94 0,94	1,11 1,12 1,16	1	1,47 1,60 1,68	6,31 5,76 5,31	1,99 2,25 2,45
A_8	0,47 0,40 0,35	0,54 0,47 0,42	0,57 0,50 0,46	0,55 0,47 0,43	0,64 0,59 0,56	0,75 0,70 0,69	0,68 0,63 0,60	1	4,27 3,61 3,17	1,35 1,41 1,46
A_9	0,11 0,11 0,11	0,13 0,13 0,13	0,13 0,14 0,14	0,13 0,13 0,14	0,15 0,16 0,18	0,18 0,19 0,22	0,16 0,17 0,19	0,23 0,28 0,32	1	0,31 0,39 0,46
A_{10}	0,35 0,28 0,24	0,40 0,33 0,29	0,42 0,35 0,31	0,41 0,34 0,29	0,48 0,42 0,38	0,56 0,50 0,47	0,50 0,44 0,41	0,74 0,71 0,69	3,18 2,56 2,17	1

Таблица 10. Набор локальных приоритетов альтернатив по критериям
Table 10. A set of local priorities of alternatives by criteria

Альтернатива	K_1			K_2			K_3
	v_L	v_C	v_R	v_L	v_C	v_R	v
A_1	0,152	0,161	0,171	0,016	0,016	0,016	0,040
A_2	0,134	0,139	0,143	0,091	0,088	0,086	0,095
A_3	0,126	0,129	0,131	0,055	0,051	0,047	0,022
A_4	0,132	0,136	0,140	0,082	0,079	0,073	0,084
A_5	0,113	0,110	0,108	0,120	0,121	0,122	0,142
A_6	0,096	0,092	0,087	0,110	0,108	0,106	0,059
A_7	0,106	0,103	0,101	0,116	0,117	0,117	0,117
A_8	0,072	0,065	0,060	0,140	0,144	0,148	0,196
A_9	0,017	0,018	0,019	0,133	0,136	0,140	0,095
A_{10}	0,054	0,046	0,041	0,137	0,141	0,145	0,151

Таблица 11. Предпочтения лица, принимающего решения, относительно критериев
Table 11. Decision maker's preferences regarding criteria

Критерий	K_1	K_2	K_3	Коэффициенты важности
K_1	1,00	5,00	2,08	0,595
K_2	0,20	1,00	0,42	0,119
K_3	0,48	2,40	1,00	0,286

Таблица 12. Набор глобальных приоритетов альтернатив
Table 12. A set of global priorities of alternatives

Альтернатива	LLL	LLC	LLR	LCL	LRL	LRR	LRC	LCR	LCC
A ₂	0,118	0,118	0,118	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117
A ₄	0,112	0,112	0,112	0,112	0,111	0,111	0,111	0,112	0,112
A ₅	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122
A ₇	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111
A ₈	0,115	0,115	0,115	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116
№ победившей	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	CCC	CCL	CCR	CLC	CRC	CRR	CRL	CLR	CLL
A ₂	0,12041	0,12041	0,12041	0,12079	0,12010	0,12010	0,12010	0,12079	0,12079
A ₄	0,11440	0,11440	0,11440	0,11484	0,11376	0,11376	0,11376	0,11484	0,11484
A ₅	0,12034	0,12034	0,12034	0,12020	0,12047	0,12047	0,12047	0,12020	0,12020
A ₇	0,10884	0,10884	0,10884	0,10877	0,10890	0,10890	0,10890	0,10877	0,10877
A ₈	0,11153	0,11153	0,11153	0,11104	0,11206	0,11206	0,11206	0,11104	0,11104
№ победившей	2	2	2	2	5	5	5	2	2
	RRR	RRC	RRL	RCR	RLR	RLL	RLC	RCL	RCC
A ₂	0,123	0,123	0,123	0,123	0,106	0,123	0,123	0,123	0,123
A ₄	0,116	0,116	0,116	0,117	0,102	0,117	0,117	0,117	0,117
A ₅	0,119	0,119	0,119	0,119	0,093	0,119	0,119	0,119	0,119
A ₇	0,107	0,107	0,107	0,107	0,088	0,107	0,107	0,107	0,107
A ₈	0,109	0,109	0,109	0,109	0,070	0,108	0,108	0,109	0,109
№ победившей	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Таблица 13. Многокритериальные оценки альтернатив с учетом неопределенности предпочтений лица, принимающего решения
Table 13. Multi-criteria assessments of alternatives taking into account the uncertainty of decision makers' preferences

Альтернатива	P_i	V_{iL}	V_{iC}	V_{iR}
A ₂	0,555	0,106	0,1145	0,123
A ₄	0	0,102	0,1095	0,117
A ₅	0,444	0,093	0,1075	0,122
A ₇	0	0,088	0,0995	0,111
A ₈	0	0,07	0,093	0,116

Результаты оценки альтернатив по формулам (9)–(12) представлены в табл. 13.

Из табл. 12, 13 можно сделать вывод, что лучшей является альтернатива A₂. При этом альтернативы A₄ и A₅ также могут быть эффективными, их необходимо оставить для более детального рассмотрения на последующих этапах исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен метод АНР с точки зрения его применения к задачам с большим количеством альтернатив и критериев, приведены достоинства и недостатки оригинального метода.

Предложена методика выявления предпочтений ЛПР при заполнении матриц парных сравнений альтернатив по критериям, которая позволяет снизить число запросов к ЛПР при высокой согласованности результатов. Важной особенностью методики является

возможность выражать предпочтения ЛПР относительно оценок альтернатив по критериям в интервальном или нечетком виде. Такая модификация оригинального метода имеет большое значение для решения задач с большим горизонтом планирования, где существует высокая неопределенность предпочтений ЛПР.

Предложен подход для ранжирования альтернатив по многокритериальным оценкам, полученным на основе интервальных или нечетких ответов от ЛПР.

Представлен пример выбора структуры генерирующих мощностей с использованием модифицированного метода АНР и построением нечеткой модели предпочтений ЛПР.

Предложенная диалоговая процедура по выявлению предпочтений ЛПР и построению матриц парных сравнений альтернатив по критериям может быть реализована в виде программы для ЭВМ.

Список источников

1. Саати Т. Л., Керис К. П. Аналитическое планирование. Организация систем / пер. с англ. И. А. Ушакова. М.: Изд-во «Радио и связь», 1991. 244 с.
2. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. М.: Изд-во «Радио и связь», 1993. 278 с.
3. Marinakis V., Doukas H., Xidonas P., Zopounidis C. Multicriteria decision support in local energy planning: an evaluation of alternative scenarios for the sustainable energy action plan // *Omega*. 2017. Vol. 69. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.07.005>.
4. Oree V., Sayed Hassen S. Z., Fleming P. J. Generation expansion planning optimisation with renewable energy integration: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 69. P. 790–803. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.120>.
5. Malkawi S., Al-Nimr M., Azizi D. A multi-criteria optimization analysis for Jordan's energy mix // *Energy*. 2017. Vol. 127. P. 680–696. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.015>.
6. Lombardi P., Sokolnikova T., Suslov K., Voropai N., Styczynski Z. A. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energies? // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 90. P. 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.016>.
7. Ossadnik W., Kaspar R. Evaluation of AHP software from a management accounting perspective // *Journal of Modelling in Management*. 2013. Vol. 8. Iss. 3. P. 305–319. <https://doi.org/10.1108/JM2-01-2011-0007>.
8. Сологубова Л. А., Кулаков А. А., Байбекова Ф. Н., Трунькина О. В., Беспалова Н. М. Программная реализация принятия решений с помощью метода анализа иерархий // *iPolytech Journal*. 2018. Т. 22. № 11. С. 145–158. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-145-158>.
9. Ishizaka A., Labib A. Analytic hierarchy process and expert choice: benefits and limitations // *OR Insight*. 2009. Vol. 22. Iss. 4. P. 201–220. <https://doi.org/10.1057/ori.2009.10>.
10. Подиновский В. В., Подиновская О. В. Ещё раз о некорректности метода анализа иерархий // *Проблемы управления*. 2012. № 4. С. 75–78.
11. Dede G., Kamalakidis T., Spichopoulos T. Theoretical estimation of the probability of weight rank reversal in pairwise comparisons // *European Journal of Operational Research*. 2016. Vol. 252. Iss. 2. P. 587–600. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.01.059>.
12. Majumdar A., Tiwari M. K., Agarwal A., Prajapat K. A new case of rank reversal in analytic hierarchy process due to aggregation of cost and benefit criteria // *Operations Research Perspectives*. 2021. Vol. 8. P. 100185. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2021.100185>.
13. Noghin V. D. A simplified variant of the analytic hierarchy process based on a nonlinear scalarizing function // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2004. Vol. 44. Iss. 7. P. 1194–1202.
14. Alam K. A., Ahmed R., Butt F. S., Kim Soon-Gohn, Ko Kwang-Man. An uncertainty-aware integrated fuzzy AHP-WASPAS model to evaluate public cloud computing services // *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 130. P. 504–509. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.068>.
15. Zhu Guo-Niu, Hu Jie, Ren Hongliang. A fuzzy rough number-based AHP-TOPSIS for design concept evaluation under uncertain environments // *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 91. P. 106228. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106228>.
16. Dogan O. Process mining technology selection with spherical fuzzy AHP and sensitivity analysis // *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 178. P. 114999. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114999>.
17. Нефедов А. С., Шакиров В. А. Автоматизация процедуры заполнения матриц парных сравнений альтернатив по критериям при использовании метода анализа иерархий // *Информационные технологии*. 2019. Т. 25. № 6. С. 331–339. <https://doi.org/10.17587/it.25.331-339>.
18. Khan I. Power generation expansion plan and sustainability in a developing country: a multi-criteria decision analysis // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 220. P. 707–720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.161>.
19. Ullah Z., Elkadeem M. R., Kotb K. M., Taha I. B. M., Wang Shaorong. Multi-criteria decision-making model for optimal planning of on/off grid hybrid solar, wind, hydro, biomass clean electricity supply // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 179. P. 885–910. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.063>.
20. Нефедов А. С., Яковкина Т. Н. Многокритериальный выбор мощности электростанций на основе возобновляемых источников энергии и местных видов топлива в составе локальной энергосистемы // *iPolytech Journal*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1255–1270. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1255-1270>.

References

1. Saaty T. L., Kearns K. P. Analytical planning. The organization of systems, 1995, 208 p. (Russ. ed.: *Analiticheskoe planirovanie. Organizaciya sistem*. Moscow, Radio i svyaz'; 1991, 244 p.)
2. Saati. T. Analytic hierarchy process, 1991, 278 p. (Russ. ed.: *Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij*. Moscow, Radio i svyaz'; 1991, 278 p.)
3. Marinakis V., Doukas H., Xidonas P., Zopounidis C. Multicriteria decision support in local energy planning: an evaluation of alternative scenarios for the sustainable energy action plan. *Omega*. 2017;69:1-16. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.07.005>.
4. Oree V., Sayed Hassen S. Z., Fleming P. J. Generation expansion planning optimisation with renewable energy integration: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;69:790-803. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.120>.
5. Malkawi S., Al-Nimr M., Azizi D. A multi-criteria optimi-

zation analysis for Jordan's energy mix. *Energy*. 2017;127:680-696.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.015>.

6. Lombardi P., Sokolnikova T., Suslov K., Voropai N., Styczynski Z. A. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energies? *Renewable Energy*. 2016;90:532-541.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.016>.

7. Ossadnik W., Kaspar R. Evaluation of AHP software from a management accounting perspective. *Journal of Modelling in Management*. 2013;8(3):305-319.
<https://doi.org/10.1108/JM2-01-2011-0007>.

8. Sologubova L. A., Kulakov A. A., Baibekova F. N., Trun'kina O. V., Bespalova N. M. Decision-making software implementation using hierarchy analysis method. *iPolytech Journal*. 2018;22:145-158. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-145-158>.

9. Ishizaka A., Labib A. Analytic hierarchy process and expert choice: benefits and limitations. *OR Insight*. 2009;22(4):201-220. <https://doi.org/10.1057/ori.2009.10>.

10. Podinovskij V. V., Podinovskaya O. V. Once again on the incorrectness of the hierarchy analysis method. *Problemy upravleniya = Control Sciences*. 2012;4:75-78. (In Russ.).

11. Dede G., Kamalakis T., Sphicopoulos T. Theoretical estimation of the probability of weight rank reversal in pairwise comparisons. *European Journal of Operational Research*. 2016;252(2):587-600.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.01.059>.

12. Majumdar A., Tiwari M. K., Agarwal A., Prajapat K. A new case of rank reversal in analytic hierarchy process due to aggregation of cost and benefit criteria. *Operations Research Perspectives*. 2021;8:100185.
<https://doi.org/10.1016/j.orp.2021.100185>.

13. Noghin V. D. A simplified variant of the analytic hierarchy process based on a nonlinear scalarizing function.

Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2004;44(7):1194-1202.

14. Alam K. A., Ahmed R., Butt F. S., Kim Soon-Gohn, Ko Kwang-Man. An uncertainty-aware integrated fuzzy AHP-WASPAS model to evaluate public cloud computing services. *Procedia Computer Science*. 2018;130:504-509.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.068>.

15. Zhu Guo-Niu, Hu Jie, Ren Hongliang. A fuzzy rough number-based AHP-TOPSIS for design concept evaluation under uncertain environments. *Applied Soft Computing*. 2020;91:106228.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106228>.

16. Dogan O. Process mining technology selection with spherical fuzzy AHP and sensitivity analysis. *Expert Systems with Applications*. 2021;178:114999.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114999>.

17. Nefedov A. S., Shakirov V. A. Automation of the procedure for filling matrices of pairwise comparison of alternatives by criteria when using the analytic hierarchy process. *Informacionnye tekhnologii*. 2019;25(6):331-339.
<https://doi.org/10.17587/it.25.331-339>. (In Russ.).

18. Khan I. Power generation expansion plan and sustainability in a developing country: a multi-criteria decision analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2019;220:707-720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.161>.

19. Ullah Z., Elkadeem M. R., Kotb K. M., Taha I. B. M., Wang Shaorong. Multi-criteria decision-making model for optimal planning of on/off grid hybrid solar, wind, hydro, biomass clean electricity supply. *Renewable Energy*. 2021;179:885-910.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.063>.

20. Nefedov A. S., Yakovkina T. N. Multi-criterial choice of capacity of power plants based on renewable energy sources and local fuels within local energy system. *iPolytech Journal*. 2020;24(6):1255-1270. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1255-1270>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нефедов Александр Сергеевич,
старший преподаватель кафедры энергетики,
Братский государственный университет,
665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40

Шакиров Владислав Альбертович,
кандидат технических наук, доцент ВАК,
старший научный сотрудник
Лаборатории энергоснабжения децентрализованных потребителей,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Игнатьева Светлана Михайловна,
кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры энергетики,
Братский государственный университет,
665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr S. Nefedov,
Senior Lecturer of the Energy Department,
Bratsk State University,
40, Makarenko St., Bratsk 665709, Russia

Vladislav A. Shakirov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher of the Laboratory of Energy Supply of Off-Grid Consumers,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Svetlana M. Ignatieva,
Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor,
Associate Professor of the Energy Department,
Bratsk State University,
40, Makarenko St., Bratsk 665709, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.03.2022; одобрена после рецензирования 28.04.2022; принята к публикации 04.08.2022.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 06.03.2022; approved after reviewing 28.04.2022; accepted for publication 04.08.2022.