

МЕТОД ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РИСКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЧАСТКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Ю. В. Колотилов¹, И. Г. Воеводин², А. А. Ковалев¹

¹Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация

²Астраханский государственный университет,
Астрахань, Российская Федерация

Рассматривается применение метода анализа иерархий в задаче определения относительной величины работоспособности участков энергетической системы. Для участков энергетической системы, оцениваемых по группам критериев и составляющим их критериям, описан процесс построения иерархии. Представлен процесс заполнения балльных оценок и матриц парных сравнений, а также вычисления компонентов векторов приоритетов для каждого из уровней иерархии. Сформулированы аналитические выражения для синтеза приоритетов и определения величин относительного риска возникновения неработоспособности по каждому из участков. Построена диаграмма, демонстрирующая относительный риск возникновения неработоспособности отдельных участков энергетической системы.

Ключевые слова: принятие решений, метод анализа иерархий, участки энергетической системы, вектор приоритетов, матрица парных сравнений.

Для цитирования: Колотилов Ю. В., Воеводин И. Г., Ковалев А. А. Метод принятия решений по определению относительного риска работоспособности участков энергетической системы // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 2. С. 20–28. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-2-20-28.

Введение

Практически в любой сфере жизнедеятельности человеку требуется принимать решения. Принятие решений зачастую представляет собой трудоемкий многоэтапный процесс, особенно при управлении сложными техническими системами и при наличии большого количества альтернативных вариантов. В наши дни создается специальное программное обеспечение, упрощающее процесс принятия решений для человека – системы поддержки принятия решений (СППР). Данные системы представляют собой специализированные автоматизированные системы, целью которых является помощь лицам, принимающим решения на основе анализа определенного набора исходных данных. Этот класс программного обеспечения сформировался в результате синтеза систем управления базами данных и управленческих автоматизированных систем.

Системы поддержки принятия решений в своей работе используют различные методы принятия решений. Метод анализа иерархий (МАИ) является известным и часто используемым инструментом при принятии комплексных решений [1–3]. Данный метод подразумевает представление процесса принятия решения в виде иерархической структуры: вершиной структуры является решение, ниже расположены группы критериев, объединяющие критерии, по которым осуществляется оценка альтернатив, на нижнем уровне иерархии расположены объекты, которые сравниваются по значениям критериев более высоких уровней.

Кроме построения иерархической структуры МАИ подразумевает определение приоритетов критериев и их групп [4–6]. Данный этап включает в себя сравнение как количественных, так и качественных показателей с использованием экспертных оценок, что позволяет использовать полученные результаты в процессе принятия решений. Заключительным этапом является вычисление приоритетов рассматриваемых объектов по отношению к главной цели.

Предлагаемая нами иерархическая структура для определения относительного риска возникновения неработоспособности (безразмерная величина в диапазоне от 0 до 1) участков энергетической системы (ЭС) использует понятие приоритета объекта [7–9].

Формирование элементов и структуры аналитической иерархии для определения относительного риска возникновения неработоспособности участков ЭС

Рассмотрим процесс формирования элементов иерархии на анализируемых уровнях, начиная с высшего, который обозначим как уровень 0.

В табл. 1 приведена шкала балльных оценок, принятая в методе анализа иерархий для сравнения элементов Э1 и Э2 иерархии на каждом уровне (\Leftrightarrow – знак сравнения).

Таблица 1

Принцип построчного сравнения элементов и их оценка в баллах

| Сравнение | Определение | Балл |
|-------------------------|---|------|
| Э1 \Leftrightarrow Э1 | При сравнении одинаковых элементов предпочтение не отдается | 1 |
| Э1 \Leftrightarrow Э2 | Первый элемент Э1 имеет легкое предпочтение по отношению ко второму элементу Э2 | 2 |
| Э1 \Leftrightarrow Э2 | Первый элемент Э1 имеет среднее предпочтение по отношению ко второму элементу Э2 | 4 |
| Э1 \Leftrightarrow Э2 | Первый элемент Э1 имеет сильное предпочтение по отношению ко второму элементу Э2 | 7 |
| Э1 \Leftrightarrow Э2 | Первый элемент Э1 имеет абсолютное предпочтение по отношению ко второму элементу Э2 | 9 |

Уровень 0 соответствует определению цели принятия решения – оценки относительного риска возникновения неработоспособности участков ЭС.

Принимаем, что система состоит из 5 участков, имеющих идентификаторы величины относительного риска возникновения неработоспособности $R_{m=1}, R_{m=2}, R_{m=3}, R_{m=4}, R_{m=5}$, где $m = 1$ – участок № 1, $m = 2$ – участок № 2, ..., $m = 5$ – участок № 5.

Уровень 1 представляет собой группы критериев для определения величины относительного риска нарушения работоспособности участков ЭС. На этом уровне осуществляется сравнение относительной важности групп критериев по их влиянию на принятие решения на уровне 0: G_1 – регламентная группа критериев; G_2 – индустриальная группа критериев; G_3 – природоохранная группа критериев; G_4 – стоимостная группа критериев; G_5 – организационно-статистическая группа критериев.

Рассмотрим сравнение групп критериев и соответствующие балльные оценки в табл. 2 – матрице парных сравнений групп критериев. Матрицу парных сравнений A заполняет эксперт на основе предпочтений, являющихся результатом анализа предметной области.

Таблица 2

Матрица парных сравнений групп критериев

| $A =$ | G | G_1 | G_2 | G_3 | G_4 | G_5 | Компоненты вектора приоритетов групп критериев | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|---------------|
| | G_1 | 1 | 2 | 4 | 6 | 9 | | $g_1 = 0,456$ |
| | G_2 | 1/2 | 1 | 3 | 5 | 7 | | $g_2 = 0,299$ |
| | G_3 | 1/4 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | | $g_3 = 0,142$ |
| | G_4 | 1/6 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | | $g_4 = 0,069$ |
| | G_5 | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | | $g_5 = 0,034$ |
| Сумма компонентов вектора приоритетов групп критериев | | | | | | | $g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5 = 1$ | |

В соответствии с алгоритмом заполнения квадратных матриц парных сравнений, для каждой строки в случае доминирования элемента G_1 над элементом G_2 , ячейка таблицы на пересечении строки G_1 и столбца G_2 должна заполняться целым числом $G_1 \Leftrightarrow G_2$, а ячейка на пересечении строки G_2 и столбца G_1 заполняется дробью, обратной целому числу $G_1 \Leftrightarrow G_2$. При доминировании элемента G_2 над элементом G_1 в ячейку на пересечении строки G_1 и столбца G_2 записывается дробное число $G_1 \Leftrightarrow G_2$, а в ячейку на пересечении строки G_2 и столбца G_1 – обратное ему целое число. При отсутствии предпочтений между элементами G_1 и G_2 в обе ячейки ставятся единицы. Эксперту необходимо последовательно выставить балльные оценки по шкале от 1 до 9 [10–12].

Заполним матрицу, принимая во внимание шкалу относительной важности суждений, представляющую собой ответ на вопрос «Какая группа критериев оказывает наибольшее влияние на снижение работоспособности объекта?».

В приведенной матрице сравниваются группы критериев уровня 1 иерархии относительно их влияния на цель принятия решений, расположенную на уровне 0. Суждения эксперта в данном случае свидетельствуют о большей важности регламентной группы критериев, т. к. регламентные критерии важнее индустриальных (оценка «2 балла») и существенно важнее критериев природоохранной группы (оценка «4 балла»), и т. д. Такие же матрицы необходимо заполнить для всех элементов, включенных в иерархию.

Матрицы парных сравнений ($A = \{G_1 \Leftrightarrow G_1, G_1 \Leftrightarrow G_2, G_1 \Leftrightarrow G_3, G_1 \Leftrightarrow G_4, G_1 \Leftrightarrow G_5; G_2 \Leftrightarrow G_1, G_2 \Leftrightarrow G_2, G_2 \Leftrightarrow G_3, G_2 \Leftrightarrow G_4, G_2 \Leftrightarrow G_5; G_3 \Leftrightarrow G_1, G_3 \Leftrightarrow G_2, G_3 \Leftrightarrow G_3, G_3 \Leftrightarrow G_4, G_3 \Leftrightarrow G_5; G_4 \Leftrightarrow G_1, G_4 \Leftrightarrow G_2, G_4 \Leftrightarrow G_3, G_4 \Leftrightarrow G_4, G_4 \Leftrightarrow G_5; G_5 \Leftrightarrow G_1, G_5 \Leftrightarrow G_2, G_5 \Leftrightarrow G_3, G_5 \Leftrightarrow G_4, G_5 \Leftrightarrow G_5\}$, где $n = 5$ – размерность матрицы (5 строк и 5 столбцов), \Leftrightarrow – знак сравнения, обладают свойством обратной симметрии, т. е. $a_{ij} = 1/a_{ji}$ (где a_{ij} – элемент матрицы на пересечении i -й строки и j -го столбца), поэтому для заполнения матрицы A размерностью n достаточно провести $n(n - 1)/2$ парных сравнений ее элементов. В то же время известно, что для упорядочивания n объектов достаточно выполнить $(n - 1)$ сравнений. Значения этих выражений совпадают только для $n = 2$. Для матриц большей размерности число экспертных суждений, записываемых в A , превышает $(n - 1)$, следовательно, упорядочивание элементов может быть неоднозначным. Это связано с проблемой согласованности суждений [13, 14]. Для решения проблемы согласованности суждений в МАИ предусмотрены следующие действия:

- анализ использования избыточного количества экспертных суждений с целью проверки на их согласованность;
- вычисление индекса согласованности (CI), по значениям которого оценивается непротиворечивость суждений эксперта;
- анализ нарушения согласованности (транзитивности) суждений; нарушение транзитивности свидетельствует о низком качестве исходных данных, что позволяет своевременно принять меры для их корректировки.

В целях конкретизации алгоритма запишем соотношения для определения компонентов собственного вектора $G\{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5\}$, главного собственного значения λ_{\max} и индекса согласованности CI матрицы A (см. табл. 2) в виде соответствующих параметров ($S, S_{1-5}, g_k, L, L_{1-5}$):

$$S_1 = [(G_1 \Leftrightarrow G_1)(G_1 \Leftrightarrow G_2)(G_1 \Leftrightarrow G_3)(G_1 \Leftrightarrow G_4)(G_1 \Leftrightarrow G_5)]^{1/5};$$

$$S_2 = [(G_2 \Leftrightarrow G_1)(G_2 \Leftrightarrow G_2)(G_2 \Leftrightarrow G_3)(G_2 \Leftrightarrow G_4)(G_2 \Leftrightarrow G_5)]^{1/5};$$

$$S_3 = [(G_3 \Leftrightarrow G_1)(G_3 \Leftrightarrow G_2)(G_3 \Leftrightarrow G_3)(G_3 \Leftrightarrow G_4)(G_3 \Leftrightarrow G_5)]^{1/5};$$

$$S_4 = [(G_4 \Leftrightarrow G_1)(G_4 \Leftrightarrow G_2)(G_4 \Leftrightarrow G_3)(G_4 \Leftrightarrow G_4)(G_4 \Leftrightarrow G_5)]^{1/5};$$

$$S_5 = [(G_5 \Leftrightarrow G_1)(G_5 \Leftrightarrow G_2)(G_5 \Leftrightarrow G_3)(G_5 \Leftrightarrow G_4)(G_5 \Leftrightarrow G_5)]^{1/5};$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5;$$

$$g_1 = \{[(G_1 \Leftrightarrow G_1)(G_1 \Leftrightarrow G_2)(G_1 \Leftrightarrow G_3)(G_1 \Leftrightarrow G_4)(G_1 \Leftrightarrow G_5)]^{1/5} / S;$$

$$g_2 = \{[(G_2 \Leftrightarrow G_1)(G_2 \Leftrightarrow G_2)(G_2 \Leftrightarrow G_3)(G_2 \Leftrightarrow G_4)(G_2 \Leftrightarrow G_5)]^{1/5} / S;$$

$$g_3 = \{[(G_3 \Leftrightarrow G_1)(G_3 \Leftrightarrow G_2)(G_3 \Leftrightarrow G_3)(G_3 \Leftrightarrow G_4)(G_3 \Leftrightarrow G_5)]^{1/5} / S;$$

$$g_4 = \{[(G_4 \Leftrightarrow G_1)(G_4 \Leftrightarrow G_2)(G_4 \Leftrightarrow G_3)(G_4 \Leftrightarrow G_4)(G_4 \Leftrightarrow G_5)]^{1/5} / S;$$

$$g_5 = \{[(G_5 \Leftrightarrow G_1)(G_5 \Leftrightarrow G_2)(G_5 \Leftrightarrow G_3)(G_5 \Leftrightarrow G_4)(G_5 \Leftrightarrow G_5)]^{1/5} / S;$$

$$\sum_{k=1,5} g_k = g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5 = 1;$$

$$L_1 = G_1 \Leftrightarrow G_1 + G_2 \Leftrightarrow G_1 + G_3 \Leftrightarrow G_1 + G_4 \Leftrightarrow G_1 + G_5 \Leftrightarrow G_1;$$

$$L_2 = G_1 \Leftrightarrow G_2 + G_2 \Leftrightarrow G_2 + G_3 \Leftrightarrow G_2 + G_4 \Leftrightarrow G_2 + G_5 \Leftrightarrow G_2;$$

$$L_3 = G_1 \Leftrightarrow G_3 + G_2 \Leftrightarrow G_3 + G_3 \Leftrightarrow G_3 + G_4 \Leftrightarrow G_3 + G_5 \Leftrightarrow G_3;$$

$$L_4 = G_1 \Leftrightarrow G_4 + G_2 \Leftrightarrow G_4 + G_3 \Leftrightarrow G_4 + G_4 \Leftrightarrow G_4 + G_5 \Leftrightarrow G_4;$$

$$L_5 = G_1 \Leftrightarrow G_5 + G_2 \Leftrightarrow G_5 + G_3 \Leftrightarrow G_5 + G_4 \Leftrightarrow G_5 + G_5 \Leftrightarrow G_5;$$

$$l_{\max} = L_1 \cdot g_1 + L_2 \cdot g_2 + L_3 \cdot g_3 + L_4 \cdot g_4 + L_5 \cdot g_5;$$

$$CI = (l_{\max} - n) / (n - 1).$$

Отметим, что приведенные формулы для расчета собственных векторов и главного собственного значения являются приближенными. Для точной оценки необходимо использовать соответствующие алгоритмы и пакеты программ [15, 16].

Для обратносимметричной матрицы всегда выполняется условие $\lambda_{\max} \geq n$ (где n – размерность матрицы). Очевидно, что при $\lambda_{\max} = n$, т. е. при $CI = 0$, можно говорить об абсолютной согласованности суждений. Соответственно, при $CI \leq 0,05$ можно считать суждения хорошо согласованными, а при $CI > 0,05$ суждения согласованы плохо и возникает необходимость их пересмотра.

Итак, получены результаты для матрицы парных сравнений уровня 1: $\{g_1, g_2, g_3, g_4, g_5\} \rightarrow n = 5$; $g_1 = 0,456$; $g_2 = 0,299$; $g_3 = 0,142$; $g_4 = 0,069$; $g_5 = 0,034$; $CI = 0,037$, которая содержит 5 групп критериев для оценки относительного риска возникновения неработоспособности ЭС.

Для уровня 2 приведем перечни показателей, составляющих соответствующие группы (K_1, K_2, K_3, K_4 и K_5) для определения величины относительного риска нарушения работоспособности участков ЭС:

1) регламентная группа показателей $K_1\{K_{11}, K_{12}, K_{13}, K_{14}, K_{15}\}$: K_{11} – соответствие правилам технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики, K_{12} – соответствие правилам вывода объектов электроэнергетики в ремонт и из эксплуатации, K_{13} – соответствие нормативным документам субъекта электроэнергетики, K_{14} – соответствие нормам завода-изготовителя, K_{15} – соответствие проекту производства работ;

2) промышленная группа показателей $K_2\{K_{21}, K_{22}, K_{23}, K_{24}, K_{25}\}$: K_{21} – соответствие технологической документации предприятия (маршрутные, операционные и технологические карты, технологические инструкции, рабочие программы), K_{22} – соответствие технологической документации завода-изготовителя, K_{23} – соответствие закупаемых запчастей необходимым техническим условиям, K_{24} – обозначенный изготовителем срок эксплуатации оборудования, K_{25} – ремонтпригодность оборудования;

3) природоохранная группа показателей $K_3\{K_{31}, K_{32}, K_{33}, K_{34}, K_{35}\}$: K_{31} – выбросы углекислого газа в атмосферу, K_{32} – плотность населения в районе субъекта электроэнергетики, K_{33} – наличие в оборудовании токсичных веществ, K_{34} – коррозионная активность грунта в районе субъекта электроэнергетики, K_{35} – потери топлива при аварии;

4) стоимостная группа показателей $K_4\{K_{41}, K_{42}, K_{43}, K_{44}, K_{45}\}$: K_{41} – стоимость устанавливаемого оборудования, K_{42} – срок амортизации устанавливаемого оборудования, K_{43} – коэффициент полезного действия (КПД) оборудования, K_{44} – функционал оборудования, K_{45} – стоимость запасных частей;

5) организационно-статистическая группа показателей $K_5\{K_{51}, K_{52}, K_{53}, K_{54}, K_{55}\}$: K_{51} – количество аварий в течение срока эксплуатации, K_{52} – квалификация и численность обслуживающего персонала, K_{53} – срок поставки запасных частей, K_{54} – количество и состав необходимого вспомогательного оборудования, K_{55} – защищенность оборудования от механических повреждений.

Приведем пример формирования матрицы парных сравнений относительной важности показателей регламентной группы K_1 и определения компонентов вектора приоритетов критериев (табл. 3).

Таблица 3

Матрица парных сравнений показателей регламентной группы

| K_1 | K_{11} | K_{12} | K_{13} | K_{14} | K_{15} | Компоненты вектора приоритетов показателей регламентной группы |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| K_{11} | 1 | 1/2 | 1/5 | 1/7 | 1/8 | $k_{11} = 0,040$ |
| K_{12} | 2 | 1 | 1/3 | 1/4 | 1/6 | $k_{12} = 0,068$ |
| K_{13} | 5 | 3 | 1 | 1/2 | 1/4 | $k_{13} = 0,159$ |
| K_{14} | 7 | 4 | 2 | 1 | 1/2 | $k_{14} = 0,273$ |
| K_{15} | 8 | 6 | 4 | 2 | 1 | $k_{15} = 0,460$ |
| Сумма компонентов вектора приоритетов критериев регламентной группы | | | | | | $k_{11} + k_{12} + k_{13} + k_{14} + k_{15} = 1$ |

Расчет вектора приоритетов показателей, включенных в данную матрицу, заключается в вычислении главного собственного вектора матрицы с максимальным собственным значением [17–19]: $\lambda_{\max} = 5,099$ и $CI = 0,025$, что меньше 0,05, следовательно, можно сделать вывод о том, что суждения хорошо согласованы.

Следуя данному принципу, необходимо вычислить векторы в остальных группах – K_2 – K_5 .

Итак, получаем компоненты векторов приоритетов показателей на 2-м уровне. Таким образом, уже имеем компоненты вектора на 1-м уровне $\{g_1, g_2, g_3, g_4, g_5\}$ и на 2-м уровне: $\{k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{14}, k_{15}\}$, $\{k_{21}, k_{22}, k_{23}, k_{24}, k_{25}\}$, $\{k_{31}, k_{32}, k_{33}, k_{34}, k_{35}\}$, $\{k_{41}, k_{42}, k_{43}, k_{44}, k_{45}\}$ и $\{k_{51}, k_{52}, k_{53}, k_{54}, k_{55}\}$.

Для определения величины относительного риска нарушения работоспособности участков ЭС необходимо произвести их парное сравнение по отношению к каждому из 25 критериев уровня 2, что даст 25 матриц парных сравнений уровня 3. В каждом случае такого сравнения эксперт формулирует вопрос вида «Какой объект имеет большую предпочтительность при рассмотрении несоответствия правилам технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики и в конечном итоге больше влияет на снижение работоспособности системы?» (пример для критерия K_{11}).

В табл. 4, где $O_{m=1}$, $O_{m=2}$, $O_{m=3}$, $O_{m=4}$ и $O_{m=5}$ – объекты, представлен пример матрицы парных сравнений объектов по критерию K_{11} , балльные оценки, выставленные экспертом, и результат расчета компонентов вектора приоритетов объектов.

Таблица 4

Матрица парных сравнений объектов по критерию K_{11}

| K_{11} | $O_{m=1}$ | $O_{m=2}$ | $O_{m=3}$ | $O_{m=4}$ | $O_{m=5}$ | Компоненты вектора приоритетов объектов по критерию K_{11} |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| $O_{m=1}$ | 1 | 1/3 | 1/6 | 1/7 | 1/8 | $r_{11,m=1} = 0,035$ |
| $O_{m=2}$ | 3 | 1 | 1/2 | 1/5 | 1/6 | $r_{11,m=2} = 0,078$ |
| $O_{m=3}$ | 6 | 2 | 1 | 1/2 | 1/3 | $r_{11,m=3} = 0,162$ |
| $O_{m=4}$ | 7 | 5 | 2 | 1 | 1/2 | $r_{11,m=4} = 0,287$ |
| $O_{m=5}$ | 8 | 6 | 3 | 2 | 1 | $r_{11,m=5} = 0,438$ |
| Сумма компонентов вектора приоритетов объектов по критерию K_{11} | | | | | | $r_{11,m=1} + r_{11,m=2} + r_{11,m=3} + r_{11,m=4} + r_{11,m=5} = 1$ |

Имеем $\lambda_{\max} = 5,109$ и $CI = 0,027 \leq 0,05$ – можно считать суждения хорошо согласованными.

Синтез приоритетов элементов иерархии для определения величины относительного риска эксплуатации участков ЭС

Для определения количественной оценки величины относительного риска нарушения работоспособности участков ЭС необходимо осуществить синтез приоритетов элементов всей иерархии. Учитывая идентификаторы величины относительного риска возникновения неработоспособности участков $R_{m=1}$, $R_{m=2}$, $R_{m=3}$, $R_{m=4}$, $R_{m=5}$, запишем аналитические выражения для синтеза приоритетов с использованием компонентов векторов приоритетов элементов иерархии на 1-м уровне $\{g_1, g_2, g_3, g_4, g_5\}$, на 2-м уровне $\{k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{14}, k_{15}\}$, $\{k_{21}, k_{22}, k_{23}, k_{24}, k_{25}\}$, $\{k_{31}, k_{32}, k_{33}, k_{34}, k_{35}\}$, $\{k_{41}, k_{42}, k_{43}, k_{44}, k_{45}\}$ и $\{k_{51}, k_{52}, k_{53}, k_{54}, k_{55}\}$ и на 3-м уровне $\{r_{UV,m}\}$, где $U = 1, 2, \dots, 5$ – номер группы критериев, $V = 1, 2, \dots, 5$ – номер критерия в группе:

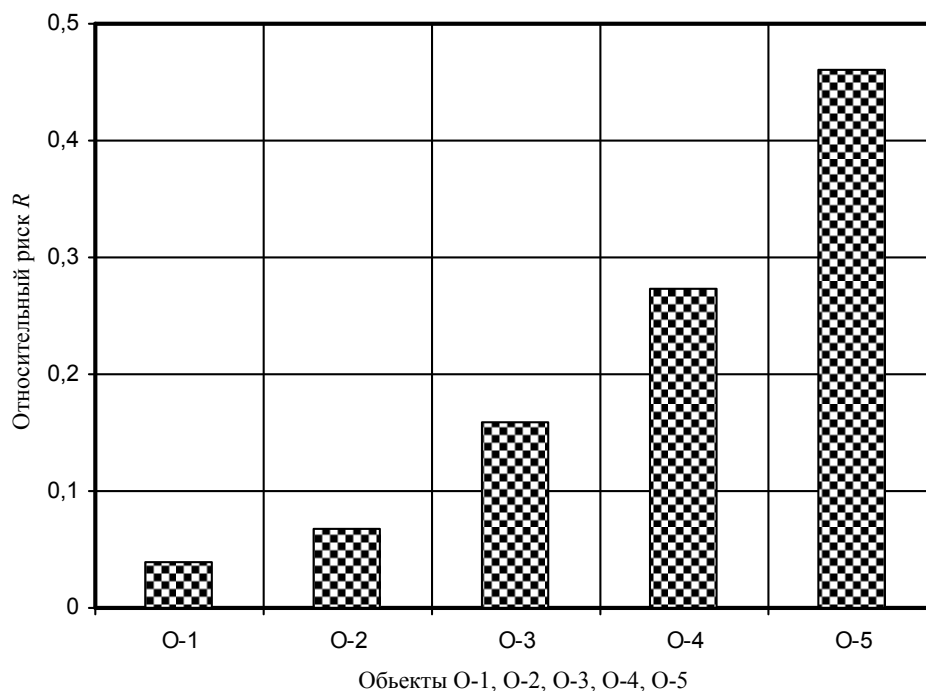
$$R_{m=1} = g_1(k_{11} \cdot r_{11,m=1} + k_{12} \cdot r_{12,m=1} + k_{13} \cdot r_{13,m=1} + k_{14} \cdot r_{14,m=1} + k_{15} \cdot r_{15,m=1}) + \\ + g_2(k_{21} \cdot r_{21,m=1} + k_{22} \cdot r_{22,m=1} + k_{23} \cdot r_{23,m=1} + k_{24} \cdot r_{24,m=1} + k_{25} \cdot r_{25,m=1}) + \\ + g_3(k_{31} \cdot r_{31,m=1} + k_{32} \cdot r_{32,m=1} + k_{33} \cdot r_{33,m=1} + k_{34} \cdot r_{34,m=1} + k_{35} \cdot r_{35,m=1}) + \\ + g_4(k_{41} \cdot r_{41,m=1} + k_{42} \cdot r_{42,m=1} + k_{43} \cdot r_{43,m=1} + k_{44} \cdot r_{44,m=1} + k_{45} \cdot r_{45,m=1}) + \\ + g_5(k_{51} \cdot r_{51,m=1} + k_{52} \cdot r_{52,m=1} + k_{53} \cdot r_{53,m=1} + k_{54} \cdot r_{54,m=1} + k_{55} \cdot r_{55,m=1});$$

$$R_{m=2} = g_1(k_{11} \cdot r_{11,m=2} + k_{12} \cdot r_{12,m=2} + k_{13} \cdot r_{13,m=2} + k_{14} \cdot r_{14,m=2} + k_{15} \cdot r_{15,m=2}) + \\ + g_2(k_{21} \cdot r_{21,m=2} + k_{22} \cdot r_{22,m=2} + k_{23} \cdot r_{23,m=2} + k_{24} \cdot r_{24,m=2} + k_{25} \cdot r_{25,m=2}) + \\ + g_3(k_{31} \cdot r_{31,m=2} + k_{32} \cdot r_{32,m=2} + k_{33} \cdot r_{33,m=2} + k_{34} \cdot r_{34,m=2} + k_{35} \cdot r_{35,m=2}) + \\ + g_4(k_{41} \cdot r_{41,m=2} + k_{42} \cdot r_{42,m=2} + k_{43} \cdot r_{43,m=2} + k_{44} \cdot r_{44,m=2} + k_{45} \cdot r_{45,m=2}) + \\ + g_5(k_{51} \cdot r_{51,m=2} + k_{52} \cdot r_{52,m=2} + k_{53} \cdot r_{53,m=2} + k_{54} \cdot r_{54,m=2} + k_{55} \cdot r_{55,m=2});$$

$$\begin{aligned}
 R_{m=3} &= g_1(k_{11} \cdot r_{11,m=3} + k_{12} \cdot r_{12,m=3} + k_{13} \cdot r_{13,m=3} + k_{14} \cdot r_{14,m=3} + k_{15} \cdot r_{15,m=3}) + \\
 &+ g_2(k_{21} \cdot r_{21,m=3} + k_{22} \cdot r_{22,m=3} + k_{23} \cdot r_{23,m=3} + k_{24} \cdot r_{24,m=3} + k_{25} \cdot r_{25,m=3}) + \\
 &+ g_3(k_{31} \cdot r_{31,m=3} + k_{32} \cdot r_{32,m=3} + k_{33} \cdot r_{33,m=3} + k_{34} \cdot r_{34,m=3} + k_{35} \cdot r_{35,m=3}) + \\
 &+ g_4(k_{41} \cdot r_{41,m=3} + k_{42} \cdot r_{42,m=3} + k_{43} \cdot r_{43,m=3} + k_{44} \cdot r_{44,m=3} + k_{45} \cdot r_{45,m=3}) + \\
 &+ g_5(k_{51} \cdot r_{51,m=3} + k_{52} \cdot r_{52,m=3} + k_{53} \cdot r_{53,m=3} + k_{54} \cdot r_{54,m=3} + k_{55} \cdot r_{55,m=3}); \\
 R_{m=4} &= g_1(k_{11} \cdot r_{11,m=4} + k_{12} \cdot r_{12,m=4} + k_{13} \cdot r_{13,m=4} + k_{14} \cdot r_{14,m=4} + k_{15} \cdot r_{15,m=4}) + \\
 &+ g_2(k_{21} \cdot r_{21,m=4} + k_{22} \cdot r_{22,m=4} + k_{23} \cdot r_{23,m=4} + k_{24} \cdot r_{24,m=4} + k_{25} \cdot r_{25,m=4}) + \\
 &+ g_3(k_{31} \cdot r_{31,m=4} + k_{32} \cdot r_{32,m=4} + k_{33} \cdot r_{33,m=4} + k_{34} \cdot r_{34,m=4} + k_{35} \cdot r_{35,m=4}) + \\
 &+ g_4(k_{41} \cdot r_{41,m=4} + k_{42} \cdot r_{42,m=4} + k_{43} \cdot r_{43,m=4} + k_{44} \cdot r_{44,m=4} + k_{45} \cdot r_{45,m=4}) + \\
 &+ g_5(k_{51} \cdot r_{51,m=4} + k_{52} \cdot r_{52,m=4} + k_{53} \cdot r_{53,m=4} + k_{54} \cdot r_{54,m=4} + k_{55} \cdot r_{55,m=4}); \\
 R_{m=5} &= g_1(k_{11} \cdot r_{11,m=5} + k_{12} \cdot r_{12,m=5} + k_{13} \cdot r_{13,m=5} + k_{14} \cdot r_{14,m=5} + k_{15} \cdot r_{15,m=5}) + \\
 &+ g_2(k_{21} \cdot r_{21,m=5} + k_{22} \cdot r_{22,m=5} + k_{23} \cdot r_{23,m=5} + k_{24} \cdot r_{24,m=5} + k_{25} \cdot r_{25,m=5}) + \\
 &+ g_3(k_{31} \cdot r_{31,m=5} + k_{32} \cdot r_{32,m=5} + k_{33} \cdot r_{33,m=5} + k_{34} \cdot r_{34,m=5} + k_{35} \cdot r_{35,m=5}) + \\
 &+ g_4(k_{41} \cdot r_{41,m=5} + k_{42} \cdot r_{42,m=5} + k_{43} \cdot r_{43,m=5} + k_{44} \cdot r_{44,m=5} + k_{45} \cdot r_{45,m=5}) + \\
 &+ g_5(k_{51} \cdot r_{51,m=5} + k_{52} \cdot r_{52,m=5} + k_{53} \cdot r_{53,m=5} + k_{54} \cdot r_{54,m=5} + k_{55} \cdot r_{55,m=5}).
 \end{aligned}$$

Вычислим значения приоритетов по приведенным формулам. Данные значения численно равны количественным оценкам величин относительного риска возникновения неработоспособности участков ЭС: $R_{m=1} = 0,039$; $R_{m=2} = 0,069$; $R_{m=3} = 0,159$; $R_{m=4} = 0,273$; $R_{m=5} = 0,460$.

Из полученных значений сформируем столбчатую диаграмму относительного риска эксплуатации участков ЭС (рис.).



Величина относительного риска эксплуатации участков энергетической системы:

$$R_{m=1} = 0,039; R_{m=2} = 0,069; R_{m=3} = 0,159; R_{m=4} = 0,273; R_{m=5} = 0,460$$

Участок ЭС, имеющий наибольшую величину относительного риска эксплуатации, в максимальной степени нуждается в ремонте.

Заключение

В рамках статьи было рассмотрено применение метода анализа иерархий в задаче определения величин относительного риска возникновения неработоспособности участков ЭС. Описан процесс построения иерархии для участков ЭС, оцениваемых по группам критериев и составляющим их критериям. Для каждого из уровней иерархии представлен процесс заполнения балльных оценок и матриц парных сравнений, а также вычисления компонентов векторов приоритетов. Сформулированы аналитические выражения для синтеза приоритетов и определения величин относительного риска возникновения неработоспособности по каждому из участков. Приводится диаграмма величин относительного риска, демонстрирующая необходимость ремонта рассматриваемых участков ЭС. В соответствии с этой диаграммой наибольшему относительному риску подвержен участок № 5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
2. Нефедов А. С. Сравнительный анализ метода Electre III и метода анализа иерархий при решении многокритериальных задач // Тр. Брат. гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 2. С. 9–15.
3. Латыпова В. А. Сравнительный анализ и выбор программных средств, реализующих метод анализа иерархий // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6. № 4 (23). С. 322–347.
4. Гривачев А. В., Авдеев В. О., Варганов В. В., Титенко Е. А. Модифицированный метод анализа иерархий для оценки наземных робототехнических комплексов // Экстремальная робототехника. 2018. Т. 1. № 1. С. 409–416.
5. Манусов В. З., Орлов Д. В. Оценка технического состояния трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой по методу анализа иерархий // Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 5. С. 17–30.
6. Башлыков А. А., Еремеев А. П. Методы и программные средства конструирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений для объектов энергетики // Вестн. Моск. энергет. ин-та. 2018. № 1. С. 72–85.
7. Поваров В. П., Бакиров М. Б., Данилов А. Д. Алгоритмы принятия решений в задачах управления сроком службы объектов ядерной энергетики // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2018. Т. 14. № 1. С. 49–58.
8. Воронков И. Е. Вектор глобальных приоритетов метода анализа иерархий как относительный показатель уровня надежности потенциальных участников инвестиционно-строительных проектов // Вестн. Белгор. гос. технол. ун-та им. В. Г. Шухова. 2018. № 11. С. 137–145.
9. Козлов А. В., Тамер О. С., Лантева С. В. Математические методы в оценке инновационных проектов // Вестн. Волж. ун-та им. В. Н. Татищева. 2019. Т. 2. № 1. С. 79–88.
10. Куренных А. Е., Осипов В. П., Посадский А. И., Судаков В. А. О повышении индекса согласованности матрицы парных сравнений в системах поддержки принятия решений // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2018. № 196. С. 1–16.
11. Нефедов А. С., Шакиров В. А. Автоматизация процедуры заполнения матриц парных сравнений альтернатив по критериям при использовании метода анализа иерархий // Информац. технологии. 2019. Т. 25. № 6. С. 331–339.
12. Заславский А. А. Об обработке матриц парных сравнений // Вестн. ЦЭМИ. 2018. № 3. С. 20.
13. Гришин А. Ф., Кочерова Е. В. Статистические модели. Построение, оценка, анализ. М.: Финансы и статистика, 2005. 416 с.
14. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: критериальный подход. М.: Физматлит, 2002. 144 с.
15. Юдин Д. Б. Вычислительные методы теории принятия решений. М.: Либроком, 2014. 320 с.
16. Дорогов В. Г., Теплова Я. О. Введение в методы и алгоритмы принятия решений. М.: Инфра-М, 2012. 240 с.
17. Лубенцова Е. В., Ожогова Е. В., Лубенцов В. Ф., Шахрай Е. А., Масютина Г. В. Метод согласованности матриц парных сравнений на основе компонент их максимальных собственных чисел // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 7. С. 78–83.
18. Федосеев В. Н., Зайцева И. А. Экспертиза объектно-пространственного моделирования ВТН методом анализа иерархий // Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений: сб. науч. тр. Иваново: Изд-во Иван. гос. политехн. ун-та, 2019. С. 136–152.
19. Любкин П. Л. Разработка метода доопределения матриц парных сравнений кратных предпочтений на основе показателя согласованности // Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2020. № 6. С. 31–36.

Статья поступила в редакцию 08.01.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юрий Васильевич Колотилов – д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры высшей и прикладной математики; Астраханский государственный технический университет; Россия, 414056, Астрахань; kolotilov_yury@mail.ru.

Илья Геннадьевич Воеводин – канд. техн. наук; доцент кафедры информационной безопасности и цифровых технологий; Астраханский государственный университет; Россия, 414056, Астрахань; ilya.voevodin@gmail.com.

Адель Ахмедович Ковалев – аспирант кафедры высшей и прикладной математики; Астраханский государственный технический университет; Россия, 414056, Астрахань; adel.kovalev123@yandex.ru.



METHOD OF MAKING DECISIONS
ON DETERMINING RELATIVE RISK
OF ENERGY SYSTEM SECTIONS INOPERABILITY

Yu. V. Kolotilov¹, I. G. Voevodin², A. A. Kovalev¹

¹Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation

²Astrakhan State University,
Astrakhan, Russian Federation

Abstract. The article considers the application of the analytic hierarchy method in the problem of determining the relative value of the energy system sections operability. The process of building a hierarchy is described for the sections of the energy system, which are assessed by the groups of criteria and by the component criteria. There is shown the process of filling in scores and matrices of paired comparisons, as well as calculating the components of priority vectors for each of the hierarchy levels. The analytical expressions are formulated for the synthesis of priorities and determination of the values of the relative risk of inoperability for each of the sections. A diagram is constructed showing the relative risk of inoperability of individual sections of the energy system.

Key words: decision making, analytic hierarchy system, sections of the energy system, priority vector, matrix of paired comparisons.

For citation: Kolotilov Yu. V., Voevodin I. G., Kovalev A. A. Method of making decisions on determining relative risk of energy system sections inoperability. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2021;2:20-28. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2021-2-20-28.

REFERENCES

1. Saati T. L. *Priniatie reshenii. Metod analiza ierarkhii* [Decision making. Analytic hierarchy method]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1993. 278 p.
2. Nefedov A. S. Sravnitel'nyi analiz metoda Electre III i metoda analiza ierarkhii pri reshenii mnogokriterial'nykh zadach [Comparative analysis of Electre III method and analytic hierarchy method in solving multicriteria problems]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2018, vol. 2, pp. 9-15.
3. Latypova V. A. Sravnitel'nyi analiz i vybor programmnykh sredstv, realizuiushchikh metod analiza ierarkhii [Comparative analysis and selecting software for implementing analytic hierarchy method]. *Modelirovanie, optimizatsiia i informatsionnye tekhnologii*, 2018, vol. 6, no. 4 (23), pp. 322-347.
4. Grivachev A. V., Avdeev V. O., Varganov V. V., Titenko E. A. Modifitsirovannyi metod analiza ierarkhii dlia otsenki nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov [Modified method of analysis of hierarchies for assessing ground-based robotic systems]. *Ekstremal'naia robototekhnika*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 409-416.
5. Manusov V. Z., Orlov D. V. Otsenka tekhnicheskogo sostoianiia transformatorov s vysokotemperaturnoi sverkhprovodiashchei obmotkoi po metodu analiza ierarkhii [Assessment of technical condition of transformers with high-temperature superconducting winding by using analytic hierarchy method]. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*, 2018, no. 5, pp. 17-30.

6. Bashlykov A. A., Eremeev A. P. Metody i programmnye sredstva konstruirovaniia intellektual'nykh sistem podderzhki priniatiia reshenii dlia ob'ektov energetiki [Methods and software for designing intelligent decision support systems for energy facilities]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2018, no. 1, pp. 72-85.
7. Povarov V. P., Bakirov M. B., Danilov A. D. Algoritmy priniatiia reshenii v zadachakh upravleniia srokom sluzhby ob'ektov iadernoi energetiki [Decision-making algorithms in problems of managing service life of nuclear power facilities]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 49-58.
8. Voronkov I. E. Vektor global'nykh prioritetrov metoda analiza ierarkhii kak otноситel'nyi pokazatel' urovnia nadezhnosti potentsial'nykh uchastnikov investitsionno-stroitel'nykh proektov [Vector of global priorities of analytic hierarchy method as relative indicator of potential participants' reliability in investment and construction projects]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova*, 2018, no. 11, pp. 137-145.
9. Kozlov A. V., Tamer O. S., Lapteva S. V. Matematicheskie metody v otsenke innovatsionnykh proektov [Mathematical methods in innovative project assessment]. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V. N. Tatishcheva*, 2019, vol. 2, no. 1, pp. 79-88.
10. Kurennykh A. E., Osipov V. P., Posadskii A. I., Sudakov V. A. O povyshenii indeksa soglasovannosti matritsy parnykh sravnenii v sistemakh podderzhki priniatiia reshenii [On increasing consistency index of pairwise comparison matrix in decision support systems]. *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha*, 2018, no. 196, pp. 1-16.
11. Nefedov A. S., Shakirov V. A. Avtomatizatsiia protsedury zapolneniia matrits parnykh sravnenii al'ternativ po kriteriiam pri ispol'zovanii metoda analiza ierarkhii [Automated filling in matrices of pairwise comparisons of alternatives by criteria using analytic hierarchy method]. *Informatsionnye tekhnologii*, 2019, vol. 25, no. 6, pp. 331-339.
12. Zaslavskii A. A. Ob obrabotke matrits parnykh sravnenii [On processing matrices of pairwise comparisons]. *Vestnik TsEMI*, 2018, no. 3, p. 20.
13. Grishin A. F., Kocherova E. V. *Statisticheskie modeli. Postroenie, otsenka, analiz* [Statistical models. Construction, assessment, analysis]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2005. 416 p.
14. Nogin V. D. *Priniatie reshenii v mnogokriterial'noi srede: kriterial'nyi podkhod* [Decision-making in multicriteria environment: criterion approach]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 144 p.
15. Iudin D. B. *Vychislitel'nye metody teorii priniatiia reshenii* [Computational methods of decision-making theory]. Moscow, Librokom Publ., 2014. 320 p.
16. Dorogov V. G., Teplova Ia. O. *Vvedenie v metody i algoritmy priniatiia reshenii* [Introduction to methods and algorithms of decision making]. Moscow, Infra-M Publ., 2012. 240 p.
17. Lubentsova E. V., Ozhogova E. V., Lubentsov V. F., Shakhrai E. A., Masiutina G. V. Metod soglasovannosti matrits parnykh sravnenii na osnove komponent ikh maksimal'nykh sobstvennykh chisel [Method of consistency of pairwise comparison matrices using components of their maximum eigenvalues]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2020, no. 7, pp. 78-83.
18. Fedoseev V. N., Zaitseva I. A. Ekspertiza ob'ektno-prostranstvennogo modelirovaniia VTN metodom analiza ierarkhii [Expert examination of object-spatial modeling air heat pump using analytic hierarchy method]. *Teoriia i praktika tekhnicheskikh, organizatsionno-tekhnologicheskikh i ekonomicheskikh reshenii: sbornik nauchnykh trudov*. Ivanovo, Izd-vo Ivan. gos. politekhn. un-ta, 2019. Pp. 136-152.
19. Liubkin P. L. Razrabotka metoda doopredeleniia matrits parnykh sravnenii kratnykh predpochtenii na osnove pokazatel'ia soglasovannosti [Developing method of determining pairwise comparison matrices of multiple preferences using concordance index]. *Izvestiia SPbGETU LETI*, 2020, no. 6, pp. 31-36.

The article submitted to the editors 08.01.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yury V. Kolotilov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Higher and Applied Mathematics; Astrakhan State Technical University; Russia, 414056, Astrakhan; kolotilov_yury@mail.ru.

Ilya G. Voevodin – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of IT Security and Digital Technologies; Astrakhan State University; Russia, 414056, Astrakhan; ilya.voevodin@gmail.com.

Adel A. Kovalev – Postgraduate Student of the Department of Higher and Applied Mathematics; Astrakhan State Technical University; Russia, 414056, Astrakhan; sheih0113@mail.ru.

