



УДК 620.9:658.58:519.81

© 2018 г. Д.К. Елтышев, канд. техн. наук

(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ОЦЕНКИ И УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассмотрены принципы построения системы приоритетов при эксплуатации энергетического оборудования на основе анализа разнородных данных. Предложен механизм ранжирования с учетом множества критериев и их относительной важности как элемент реализации верхнего уровня систем поддержки принятия решений при анализе и управлении состоянием оборудования.

Ключевые слова: энергетическое оборудование, многокритериальный анализ, техническое состояние, критерий оптимальности, весовой коэффициент.

DOI: 10.22250/isu.2018.56.96-107

Введение

Эффективное функционирование энергетического оборудования (ЭО) является определяющим фактором обеспечения надежной работы и безопасности систем генерации, распределения и потребления энергетических ресурсов различных масштабов и конфигураций [1 – 3]. В условиях повышенной выработки ресурса только своевременное определение потребности ЭО в ремонте может быть основой принятия своевременных мер по исключению аварийных ситуаций. При наличии большого числа энергосетевых объектов и существенного количества ЭО на их балансе необходима эффективная технология управления его состоянием, позволяющая оптимально планировать сроки и объемы проведения ремонтно-эксплуатационных мероприятий с учетом приоритета отдельных единиц или групп оборудования, ограничиваясь имеющимися ресурсами [1 – 6]. Оценка приоритетов предполагает формирование очередности реализации управляющих воздействий, включая диагностику, техническое обслуживание и вывод ЭО в ремонт, на уровне инженерно-технического и оперативно-ремонтного персонала. В такой постановке механизм оценки приоритетов реализует верхний уровень ин-

теллектуальных экспертно-диагностических систем и систем поддержки принятия решений, ориентированных на обеспечение работоспособности ЭО [7, 8]. В целях достаточной объективности принимаемых решений задача оценки приоритета должна носить комплексный характер, основанный на использовании системы критериев не только сугубо технического (состояние ЭО, режим работы и др.), но и экономического (недоотпуск электроэнергии, затраты на обслуживание и др.) содержания. Следует учитывать, что всегда существует некоторая неопределенность при оценке потребности и выводе в ремонт, связанная с неоднозначностью выбора критериев оптимальности, оценок ЭО по различным критериям и значимости отдельных критериев, а также с неполнотой данных. Поэтому необходимо формирование эффективного механизма оценки приоритетов ЭО с учетом множества факторов, характеризующих особенности его функционирования.

Постановка задачи исследования

Процедуру нахождения вектора приоритетов $\mathbf{P} = (p_1, \dots, p_n)$ при управлении состоянием ЭО представим в виде задачи многокритериального анализа [9 – 11]:

$$\langle F, A, \mathbf{K}, Y, \mathbf{W}, D \rangle, \quad (1)$$

где F – цель многокритериального выбора (оценка значимости альтернатив); $A = \{A_1, \dots, A_N\}$ – множество альтернативных вариантов реализации управляющих воздействий (например, проведение ремонтно-эксплуатационных мероприятий) для единиц ЭО, групп ЭО, отдельных энергетических объектов; $\mathbf{K} = (K_1, K_2, \dots, K_M)$ – вектор критериев оптимальности; $Y = \{y_1, \dots, y_L\}$ – множество оценок альтернатив по критериям, входящим в \mathbf{K} ; $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_M)$ – вектор весовых коэффициентов; D – решающее правило выбора альтернатив. Для решения задачи (1) предлагается разработать методику, формализующую основные этапы вычислений, включая: определение структуры и состава критериев оптимальности; выбор способа независимой (учитывая возможную большую размерность) оценки альтернатив по каждому отдельно взятому критерию; определение весовых коэффициентов критериев, характеризующих предпочтения лиц, принимающих решение; выбор решающего правила итоговой оценки приоритета.

Формализация принципов многокритериального анализа

Учитывая многофакторный характер задачи (1), предлагается использовать иерархический принцип построения системы критериев оптимальности на основе их декомпозиции и последующего агрегирования. В этом случае множество критериев разбивается на s групп (субиерархий) с комплексными критериями вида:

$$K^1 = (K_1^1, \dots, K_{M_1}^1), \dots, K^i = (K_1^i, \dots, K_{M_i}^i), \dots, K^s = (K_1^s, \dots, K_{M_s}^s).$$

При этом частные критерии K_l^i при необходимости также могут быть де-

компонованы (выступать в качестве комплексных на нижних уровнях иерархии). На начальном этапе выполняется оценка альтернатив по отдельным критериям, входящим в состав каждой субиерархии. С учетом фактора неопределенности для этих целей может быть использован метод, предложенный в [4, 5].

В результате для каждой j -й альтернативы формируются оценки $Y_j = \{y_{1,j}, y_{2,j}, \dots, y_{1,M}\}, j = 1:N$. (2)

Алгоритм преобразования иерархии критериев оптимальности при определении приоритетов альтернатив – рис. 1.

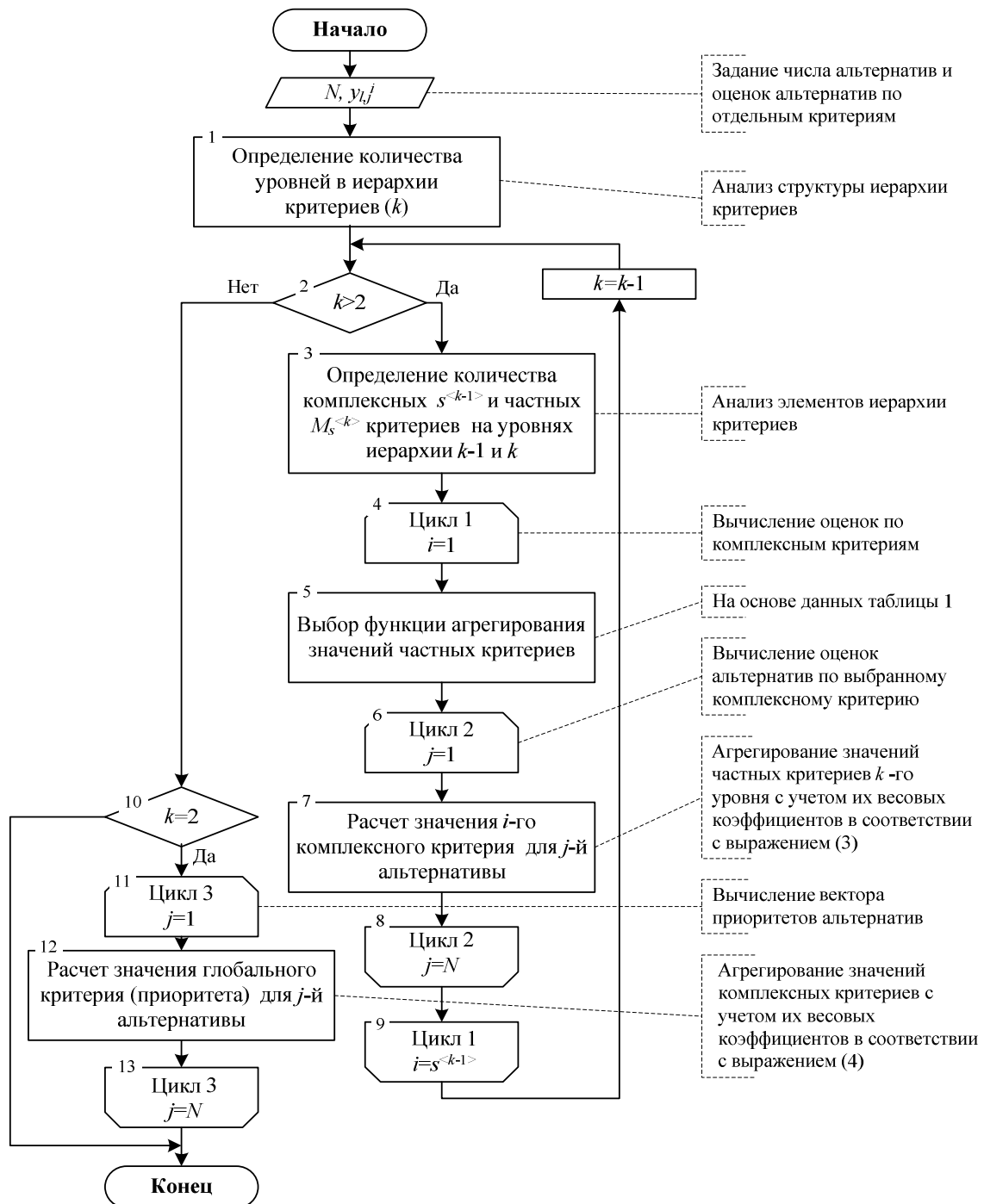


Рис. 1. Блок-схема алгоритма преобразования иерархии критериев оптимальности при определении приоритетов альтернатив.

Далее с учетом весовых коэффициентов последовательно рассчитываются оценки альтернатив по комплексным критериям Y_j^i и итоговая оценка приоритета p_j :

$$Y_j^i = f(y_{1,j}^i, w_1^i, y_{2,j}^i, w_2^i, \dots, y_{M_i,j}^i, w_{M_i}^i), i=1:M, \quad (3)$$

$$p_j = f(Y_j^1, w^1, Y_j^2, w^2, \dots, Y_j^s, w^s), j=1:N, \quad (4)$$

где $y_{l,j}^i$ – оценка j -й альтернативы по l -му частному критерию, входящему в состав i -го комплексного критерия (субиерархии); w_l^i и w^i – весовые коэффициенты l -го частного критерия, входящего в состав i -й субиерархии, и i -го комплексного критерия; f – функция нахождения агрегированной величины приоритета.

Для агрегирования частных критериев и последующего ранжирования альтернатив, порядок следования которых определяет очередность управляющих воздействий (ремонтно-эксплуатационных мероприятий) в соответствии с полученными оценками приоритета, могут быть использованы способы, приведенные в табл. 1 [11, 12].

Таблица 1

№ п/п	Наименование принципа	Аналитическое выражение
1	Принцип максимума линейной свертки критериев	$f(K) = \max_{j=1}^N \sum_{i=1}^s Y_j^i w^i$
2	Принцип максимума мультипликативной свертки критериев	$f(K) = \max_{j=1}^N \prod_{i=1}^s (Y_j^i)^{w^i}$
3	Принцип максимина Вальда	$f(K) = \max_{j=1}^N \min_{i=1}^s (Y_j^i w^i)$
4	Принцип максимума равномерной оценки критериев	$f(K) = \max_{j=1}^N \min_{i=1}^s (Y_j^i)^{w^i}$
5	Принцип пессимизма-оптимизма Гурвица	$f(K) = \alpha \min_{i=1}^s (Y_j^i w^i) + (1 - \alpha) \max_{i=1}^s (Y_j^i w^i)$
6	Принцип максимума средневзвешенной степенной оценки критериев	$f(K) = \max_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^s (Y_j^i w^i)^r \right)^{r-1}, r > 0$

Примечание. Выражения приведены на примере верхнего уровня иерархии.

Для определения весовых коэффициентов \mathbf{W} критериев предлагается использовать матрицы парных сравнений следующего вида [13 – 15]:

$$\tilde{\mathbf{B}} = \{\tilde{b}_{ij}\} = \begin{pmatrix} (1,1,1) & \tilde{b}_{12} & \dots & \tilde{b}_{1s} \\ \tilde{b}_{21} & (1,1,1) & \dots & \tilde{b}_{2s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{b}_{s1} & \tilde{b}_{s2} & \dots & (1,1,1) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $\tilde{b}_{ij} = (l'_{ij}, m'_{ij}, h'_{ij})$; $\tilde{b}_{ij} = \tilde{b}_{ji}^{-1}$, $i, j=1:s$ при $i \neq j$ или $\tilde{b}_{ij} = (1, 1, 1)$; $i = j$ представляют треугольные нечеткие числа, которыми оценивается превосходство i -го критерия над j -м в форме суждений эксперта.

Интерпретация суждений осуществляется с использованием специальной шкалы соответствий [14] (табл. 2). Такой подход в отличие от традиционного метода Саати [11] позволяет учесть неоднозначность в оценке степени превосходства одного критерия над другим как при индивидуальной, так и при групповой экспертизе.

Таблица 2

Суждение эксперта о превосходстве критерия i над критерием j	Нечеткое число		
	l_{ij}	m_{ij}	h_{ij}
Абсолютное превосходство	7	9	9
Существенное превосходство	5	7	9
Среднее превосходство	3	5	7
Небольшое превосходство	1	3	5
Примерное равенство	1	1	3

Каждый элемент матрицы (5) задан функцией принадлежности:

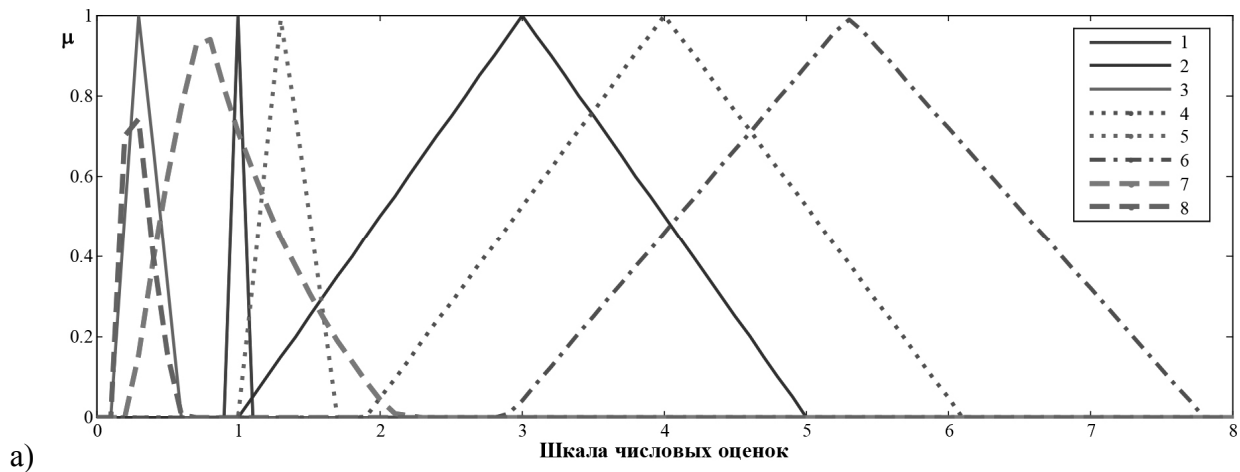
$$\mu_b(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m, \\ \frac{h-x}{h-m}, & m \leq x \leq h, \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (6)$$

Вычисление весовых коэффициентов по оценочной матрице (5) производится путем нахождения ее собственного вектора \mathbf{W} [10, 11] с использованием операций над нечеткими множествами (сложение, умножение, деление) [16, 17]. Итоговые значения весовых коэффициентов получаются в результате дефазификации нечетких чисел, входящих в состав собственного вектора матрицы, который находится из решения уравнения:

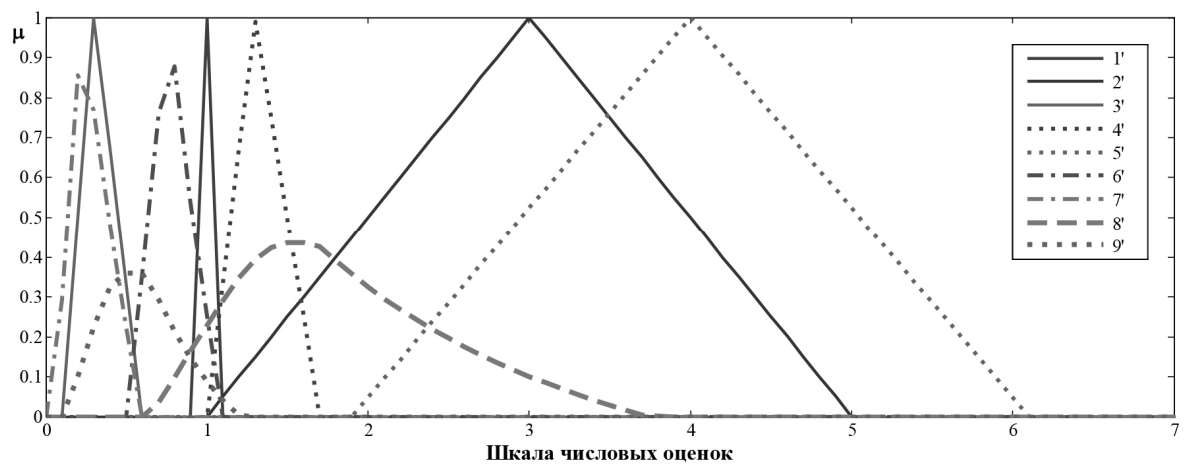
$$\tilde{\mathbf{B}} \cdot \tilde{\mathbf{W}} = \lambda_{\max} \cdot \tilde{\mathbf{W}}, \quad (7)$$

где $\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^s \tilde{b}_{ij} (w_i / w_j)$ – наибольшее собственное значение $\tilde{\mathbf{B}}$.

На рис. 2 приведен пример реализации операций над нечеткими множествами при нахождении вектора приоритетов (весовых коэффициентов) для симметричной матрицы второго порядка с элементами $\tilde{b}_{11} = (1, 1, 1)$, $\tilde{b}_{12} = (1, 3, 5)$, $\tilde{b}_{21} = \tilde{b}_{12}^{-1}$, $\tilde{b}_{22} = (1, 1, 1)$ с использованием арифметического среднего и аддитивной нормализации [5, 11].



а)



б)

Рис. 2. Графическая иллюстрация принципа вычисления весовых коэффициентов с использованием операций над нечеткими множествами при шаге дискретизации $x = 0,1$.

Цифрам на рис. 2 соответствуют следующие обозначения: 1, 1' – исходные множества $\tilde{b}_{11} = \tilde{b}_{22}$; 2, 2' – исходное множество \tilde{b}_{12} ; 3, 3' – исходное множество \tilde{b}_{21} ; 4 – множество $\tilde{c}_1 = \tilde{b}_{11} + \tilde{b}_{12}$; 5 – множество $\tilde{c}_2 = \tilde{b}_{21} + \tilde{b}_{22}$; 4' – множество $\tilde{d}_1 = \tilde{b}_{11} + \tilde{b}_{21}$; 5' – множество $\tilde{d}_2 = \tilde{b}_{12} + \tilde{b}_{22}$; 6 – множество $\tilde{c} = \sum_{i=1}^2 \tilde{c}_i$; 6' – множество $\tilde{f}_{11} = \tilde{b}_{11} / \tilde{d}_1$; 7 – итоговое множество $\tilde{w}_1 = \tilde{c}_1 / \tilde{c}$; 7' – множество $\tilde{f}_{21} = \tilde{b}_{21} / \tilde{d}_1$; 8 – итоговое множество $\tilde{w}_2 = \tilde{c}_2 / \tilde{c}$; 8' – итоговое множество $\tilde{w}_1 = \sum_{i=1}^2 \tilde{f}_{i1} / 2$; 9' – итоговое множество $\tilde{w}_2 = \sum_{i=1}^2 \tilde{f}_{i2} / 2$.

Структурно-функциональная схема предлагаемого механизма вычисления приоритетов при оценке и управлении состоянием ЭО с использованием иерархического подхода к формированию системы критериев оптимальности представлена на рис. 3.



Рис. 3. Этапы определения приоритетов при эксплуатации ЭО в условиях неопределенности исходной информации.

Исследование механизма определения приоритетов

Рассмотрим пример реализации предлагаемого подхода к оценке и управлению состоянием ЭО в процессе его эксплуатации.

В соответствии с этапом I (рис. 3) сформируем иерархическую структуру критериев оптимальности, учитывающих различные технико-экономические характеристики ЭО, по следующим принципам. Верхний уровень иерархии p соответствует целевому (глобальному) критерию оценки приоритета. Декомпозиция глобального критерия основывается на необходимости учета приоритета ЭО с позиций [4, 5]: его фактического ТС, которое является основанием для проведения различных ремонтно-эксплуатационных мероприятий (в том числе диагностика, техническое обслуживание, ремонт); его значимости в технологической цепи исследуемого объекта, которая определяет возможности проведения мероприятий (отключение, вывод в ремонт и т.д.), в том числе в условиях ограниченности ре-

сурсов. Данные факторы представим в виде следующих комплексных критериев [3 – 5, 18]: уровень технического состояния ЭО – K^1 и уровень технологической значимости ЭО – K^2 .

В качестве составляющих первого комплексного критерия выбраны: K_1^1 – «Диагностическая оценка состояния по ключевым параметрам» (класс состояния); K_2^1 – «Фактический ресурс»; K_3^1 – «Вероятность отказа». Второй комплексный критерий включает: K_1^2 – «Оценка критичности отказа» (значимость в технологическом процессе, системе поставки электроэнергии потребителю), в том числе с учетом категории надежности потребителя; K_2^2 – «Оценка затрат на проведение ремонтно-эксплуатационных работ»; K_3^2 – «Относительная производительность» (как результат передачи соответствующих объемов мощности при соответствующей продолжительности использования, характеризующий в том числе потенциальный ущерб от простоя оборудования, недоотпуска энергии потребителю).

На практике выбранные критерии могут быть расширены с учетом результатов анализа условий и особенностей эксплуатации ЭО на реальных энергосетевых объектах с использованием справочной, нормативно-технической и эксплуатационной документации, результатов мониторинга, диагностики, испытаний ЭО и прочих статистических данных, а также опыта экспертов.

Согласно выбранной структуре критериев оптимальности проведена оценка приоритета ЭО, входящего в состав электросетевых объектов Пермского края (этап II, рис. 3). В качестве альтернатив рассматривалось реально функционирующее оборудование (трансформаторы и высоковольтные выключатели с различным сроком функционирования), информация по которому была получена в процессе анализа нормативно-технической, эксплуатационной и отчетной документации, а также в результате интервьюирования экспертов. Для оценки альтернатив по критериям, определяющим уровень ТС ЭО, дополнительно были использованы методики, приведенные в [18 – 21]. Результирующие оценки по каждому из критериев представлены в формате от 0 до 1 (табл. 3, рис. 4).

Таблица 3

Критерий		Полученные оценки альтернатив
Обозначение	Название	
K_1^1	Диагностическая оценка состояния	{0,42/ a_1 ; 0,76/ a_2 ; 0,33/ a_3 ; 0,33/ a_4 ; 0,52/ a_5 }
K_2^1	Фактический ресурс	{0,71/ a_1 ; 0,79/ a_2 ; 0,66/ a_3 ; 0,69/ a_4 ; 0,76/ a_5 }
K_3^1	Вероятность отказа	{0,62/ a_1 ; 0,73/ a_2 ; 0,58/ a_3 ; 0,60/ a_4 ; 0,64/ a_5 }
K_1^2	Критичность отказа	{0,67/ a_1 ; 0,67/ a_2 ; 0,33/ a_3 ; 0,67/ a_4 ; 0,33/ a_5 }
K_2^2	Затраты на проведение работ	{0,50/ a_1 ; 0,50/ a_2 ; 0,52/ a_3 ; 0,40/ a_4 ; 0,60/ a_5 }
K_3^2	Производительность	{0,49/ a_1 ; 0,56/ a_2 ; 0,50/ a_3 ; 0,40/ a_4 ; 0,70/ a_5 }

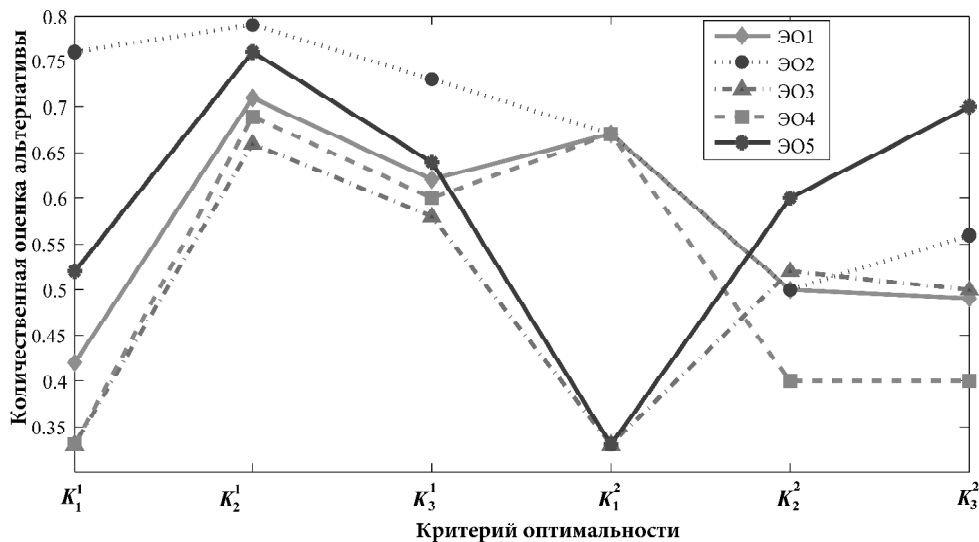


Рис. 4. Распределение оценок альтернатив по составляющим комплексного критерия оптимальности.

В соответствии с иерархией задачи оценки приоритетов (рис. 5) сформированы матрицы парных сравнений и определены весовые коэффициенты критериев оптимальности (этап III, рис. 3):

$$\mathbf{w}^1 = (0,540; 0,163; 0,297); \mathbf{w}^2 = (0,528; 0,140; 0,332); \mathbf{w} = (0,667; 0,333).$$

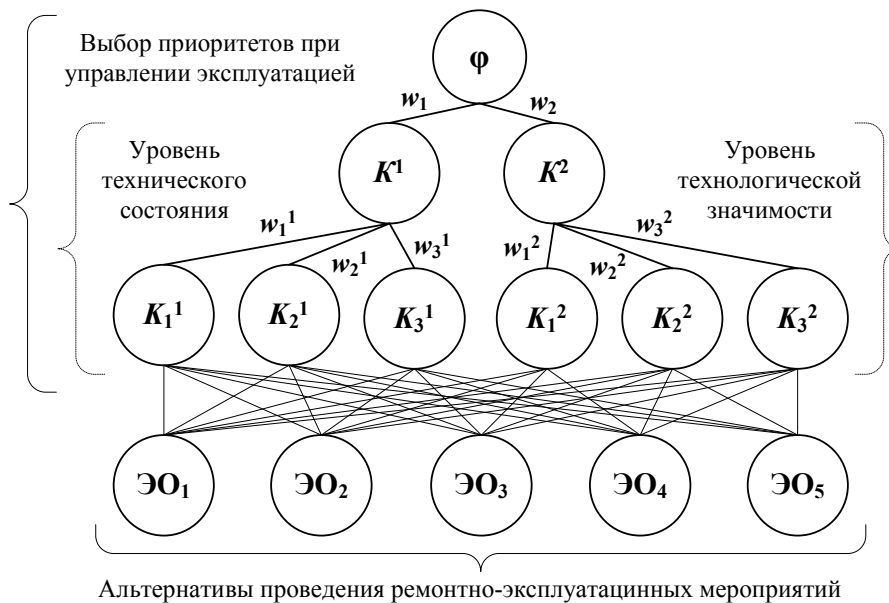


Рис. 5. Графическое представление задачи определения приоритетов при оценке и управлении состоянием ЭО в процессе эксплуатации.

Вычисление вектора приоритетов осуществлялось при различных способах реализации функции агрегирования. Итоговые результаты процедуры оценки (этап IV, рис. 3) приведены на рис. 6.

На рис. 7 показаны функции отклика, иллюстрирующие влияние способа агрегирования на итоговую зависимость глобальных оценок приоритета от значений комплексных критериев верхнего уровня.

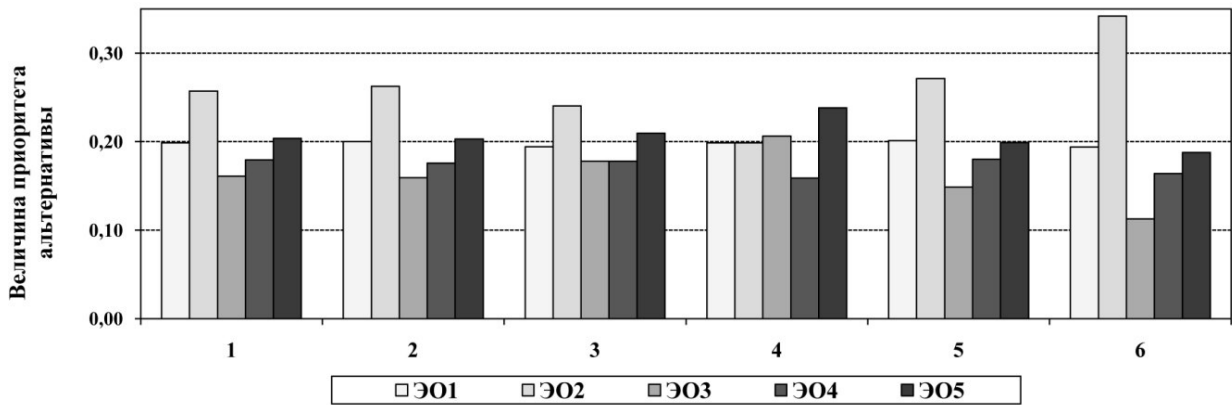


Рис. 6. Распределение оценок приоритета ЭО при различных способах агрегирования: 1 – аддитивная свертка; 2 – мультипликативная свертка; 3 – взвешенная оценка (критерий Вальда); 4 – равномерная оценка; 5 – принцип пессимизма-оптимизма; 6 – средневзвешенная степенная оценка.

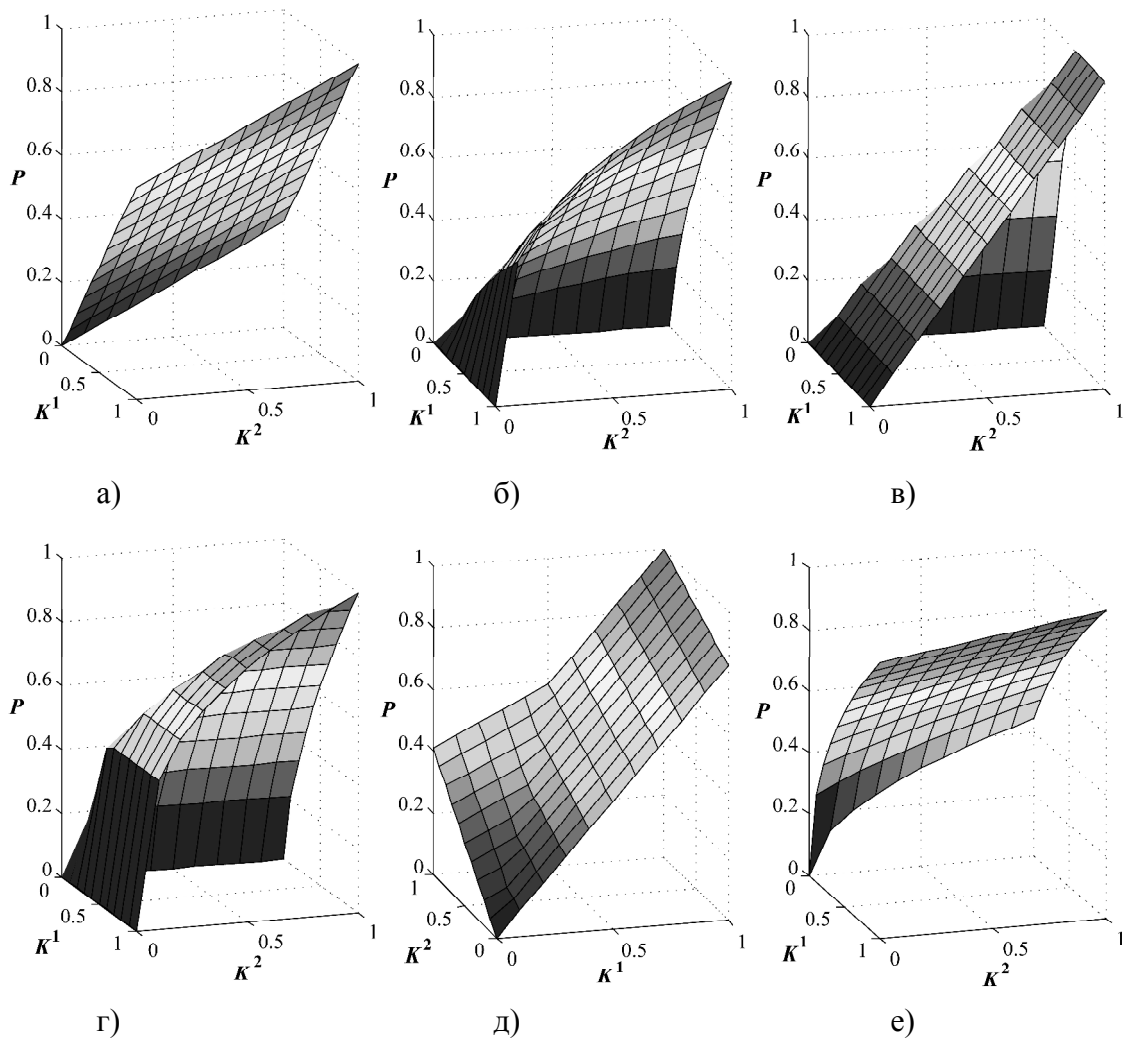


Рис. 7. Зависимость оценок P приоритета ЭО от значений факторов K^1 и K^2 : линейная свертка (а); мультипликативная свертка (б); взвешенная (в), равномерная (г) и средневзвешенная степенная (е) оценка; принцип пессимизма-оптимизма (д).

Заключение

В работе предложен механизм многокритериального анализа особенностей эксплуатации ЭО в условиях неопределенности исходной информации с учетом важности выбранных критериев оптимальности. Механизм позволяет комплексно оценить приоритет ЭО с точки зрения его потребности в управляющих воздействиях и проведении тех или иных мероприятий, обеспечивающих работоспособность. Отметим, что на итоговые оценки приоритета ЭО влияет выбор способа агрегирования составляющих многокритериальной функции, который осуществляется в зависимости от предпочтений лиц, принимающих решения.

Использование такой системы приоритетов дает возможность обоснованно определять очередность технического обслуживания и ремонта оборудования согласно фактическому техническому состоянию, чтобы обеспечить максимальную надежность и отказоустойчивость систем энергоснабжения. Механизм рассматривается как элемент интеллектуальной экспертно-диагностической системы, интегрированной с системами мониторинга и контроля технических параметров ЭО и нацеленной на анализ и управление его состоянием [7, 8, 22 – 25]. В совокупности с методами оптимизации и прогнозирования [3, 6] механизм позволит инженерно-техническому персоналу выстроить эффективную систему планирования необходимых работ и сформировать стратегию эксплуатации ЭО на краткосрочную и долгосрочную перспективу.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Петроченков А.Б.* О подходах к оценке технического состояния электротехнических комплексов и систем // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 12. – С. 16-20.
2. *Khoroshev N.I., Kazantsev V.P.* Management Support of Electroengineering Equipment Servicing Based on the Actual Technical Condition // Automation and Remote Control. – 2015. – Vol. 76, № 6. – P. 1058-1069.
3. *Хорошев Н.И., Елтышев Д.К.* Интегральная оценка и прогнозирование технического состояния оборудования электротехнических комплексов // Информатика и системы управления. – 2016. – № 4 (50). – С. 58-68.
4. *Елтышев Д.К.* Выбор приоритетов при обслуживании, модернизации и обеспечении безопасности объектов энергетики // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2017. – № 2. – С. 5-10.
5. *Бочкарев С.В., Елтышев Д.К.* Методика принятия оптимальных решений при ремонте высоковольтного электротехнического оборудования // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 6. – С. 142-146.
6. *Петроченков А.Б., Бочкарев С.В., Ромодин А.В., Елтышев Д.К.* Планирование процесса эксплуатации электротехнического оборудования с использованием теории марковских процессов // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 20-24.
7. *Елтышев Д.К.* К вопросу о разработке интеллектуальной экспертно-диагностической сис-

- темы для оценки состояния электротехнического оборудования // Системы. Методы. Технологии. – 2017. – № 3 (35). – С. 57-63.
8. *Хорошев Н.И.* Интеллектуальная поддержка принятия решений при эксплуатации энергетического оборудования на основе адаптивного кластерного анализа // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 3. – С. 123-128.
 9. Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В. и др. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. – М.: Радио и связь, 1989.
 10. *Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П.* Принятие решений на основе нечетких моделей: примеры использования. – Рига: Зинатне, 1990.
 11. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993.
 12. *Хорошев Н.И., Елтышев Д.К., Кычкин А.В.* Комплексная оценка эффективности технического обеспечения энергомониторинга // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5-4. – С. 716-720.
 13. *Неру D.* Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison // International Journal of Approximate Reasoning. – 1999. – Vol. 21. – P. 215-231.
 14. *Mon D.L., Cheng C.H., Lin J.C.* Evaluating weapon system using fuzzy analytic hierarchy process based on entropy weight // Fuzzy Sets and Systems. – 1994. – Vol. 62, Issue 2. – P. 127-134.
 15. *Wang Y.M., Luo Y., Hua Z.* On the extent analysis method for fuzzy AHP and its application // European Journal of Operational Research. – 2008. – Vol. 186. – P. 735-747.
 16. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
 17. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде *MATLAB* и *fuzzyTECH*. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
 18. *Хорошев Н.И.* Оценка технического состояния силового маслонаполненного электротехнического оборудования в различных режимах его работы // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 4. – С. 162-167.
 19. *Елтышев Д.К.* Интеллектуальные модели комплексной оценки технического состояния высоковольтных выключателей // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 5 (84). – С. 45-53.
 20. *Eltyshev D.K., Khoroshev N.I.* Diagnostics of the Power Oil-filled Transformer Equipment of Thermal Power Plants // Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 63, № 8. – P. 558-566, 2016.
 21. *Елтышев Д.К.* Экспертно-статистический метод оценки работоспособности электротехнического оборудования // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 4 (28). – С. 79-85.
 22. *Кычкин А.В., Артемов С.А., Белоногов А.В.* Распределенная система энергомониторинга реального времени на основе технологии ИОТ // Датчики и системы. – 2017. – № 8-9 (217). – С. 49-55.
 23. *Кычкин А.В.* Программно-аппаратное обеспечение сетевого энергоучетного комплекса // Датчики и системы. – 2016. – № 7 (205). – С. 24-32.
 24. *Kuchkin A.V., Mikriukov G.P.* Applied data analysis in energy monitoring system // Problemele energeticii regionale. – 2016. – Vol. 2(31). – P. 84-92,.
 25. *Кычкин А.В., Микрюков Г.П.* Метод обработки результатов мониторинга группы энергопотребителей // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2016. – № 6. – С. 9-14.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.В. Шалобановым.

E-mail:

Елтышев Денис Константинович – eltyshev@msa.pstu.ru.