

Обработка экспертных данных в интеллектуальных системах поддержки принятия решений при эксплуатации энергооборудования

Д. К. Елтышев¹, К. А. Гнутова²

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
¹eltyshev@msa.pstu.ru, ²k.gnutova@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются вопросы обработки информации в системах поддержки принятия решений при обеспечении работоспособности энергооборудования в ходе его эксплуатации. Приведена типовая структура интеллектуальной системы, ориентированной на задачи экспертно-диагностической оценки и управления состоянием энергооборудования на основе анализа статистических и экспертных данных. Предложена методика оценки предпочтений эксперта, представленных в виде матриц парных сравнений альтернатив. Методика позволяет рассчитать вектор приоритетов с использованием комплексного критерия качества и обеспечить согласованность суждений эксперта. Определены возможности применения методики при реализации элементов интеллектуальной системы поддержки принятия решений на уровне диагностики энергооборудования и планирования процесса его эксплуатации.

Ключевые слова: поддержка принятия решений; интеллектуальная система; энергооборудование; парные сравнения; экспертная оценка; критерий оптимальности

1. ВВЕДЕНИЕ

Построение единой интеллектуальной энергетической системы России определяет важную роль современных информационно-телекоммуникационных технологий, позволяющих сформировать интегрированную информационную инфраструктуру разнородных объектов генерации, передачи и потребления энергоресурсов [1–3]. В условиях нехватки финансирования в структуре таких объектов присутствует значительное число единиц энергетического оборудования (ЭО), которое выработало свой ресурс и требует замены. Для обеспечения надежной работы оборудования необходимы инструменты, ориентированные на обработку и анализ различных данных, накапливаемых в процессе его эксплуатации, и позволяющие на уровне инженерно-технического персонала принимать эффективные управленческие решения по поддержанию его работоспособности [3–6]. Такие информационно-аналитические системы должны иметь возможность работать как со статистическими, так и с экспертными данными для получения комплексных и достоверных оценок состояния ЭО и определения вариантов их дальнейшей эксплуатации [3, 4, 6].

II. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ

Современные интеллектуальные системы, ориентированные на задачи поддержки принятия решений (ППР) при эксплуатации ЭО, как правило, имеют похожую структуру [3, 4, 7]. Однако, для обеспечения таких характеристик как универсальность, адаптивность, гибкость и масштабируемость такие системы должны быть применимы ко всему парку ЭО, а не к отдельным элементам энергетической системы, иметь возможность интеграции с системами мониторинга объектов энергосети (как мобильных, так и в режиме *on-line*), использовать ретроспективную, экспертную информацию для повышения качества результата, включать эффективные методы обработки получаемых данных [2–9]. Типовая структура интеллектуальной системы ППР, осуществляющей экспертно-диагностическую оценку и управление состоянием ЭО, приведена на рис. 1.

Основа предлагаемой системы – модуль обработки данных и синтеза диагностических моделей, используемых на этапе оценки фактического технического состояния (ТС) ЭО или его работоспособности (ресурс, вероятность отказа), а также модуль многокритериального оценивания, необходимого при планировании ремонтно-эксплуатационных мероприятий.

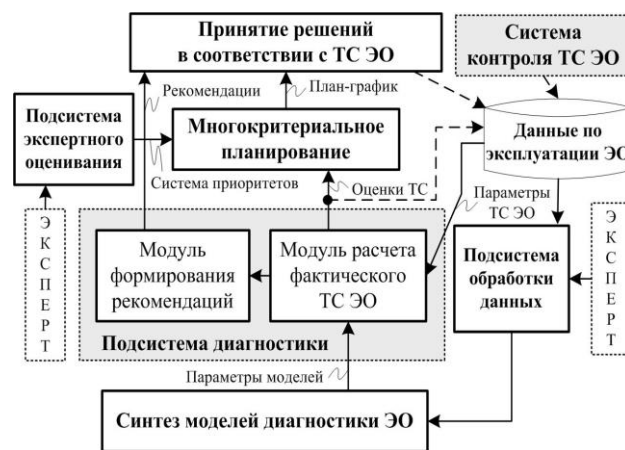


Рис. 1. Концептуальная схема интеллектуальной системы ППР при эксплуатации ЭО

Система является гибридной, то есть сочетает различные методы обработки и анализа данных (нечеткое моделирование, кластеризация, оптимизация, прогнозирование и т.д.). При наличии значительных объемов статистических данных роль эксперта в системе заключается в задании начальных условий (например, выбор объекта, методики оценки), помощи при формировании базы знаний, а также внесении дополнительной информации, необходимой для проведения комплексного анализа.

Учитывая, что не всегда информация может быть получена в полном объеме, помимо методов анализа количественных данных различного объема и содержания, требуются соответствующие методики обработки экспертной информации. Это касается в первую очередь задач построения функций принадлежности и базы правил диагностических продукционных моделей (по принципу «условие» – «заклучение»), а также оценки важности критериев оптимальности при многофакторном планировании (рис. 1). В качестве механизмов обработки экспертных данных могут быть использованы различные методики индивидуальных и коллективных оценок (интервьюирование, ассоциации, предпочтения и др.). Одним из хорошо изученных методов, применимых к указанным выше задачам, является метод парных сравнений, основанный на сопоставлении альтернативных вариантов при формировании системы предпочтений эксперта [10–12]. Процедура парных сравнений должна обеспечивать высокую согласованность получаемых оценок, чтобы принимаемые решения в части эксплуатации ЭО были достоверными. Таким образом, цель данного исследования – разработка методики обработки экспертных данных на основе парных сравнений альтернатив, используемой в системе ППР при оценке и управлении состоянием ЭО.

III. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРТНЫХ ДАННЫХ

Метод парных сравнений предполагает формирование матриц, в которых каждый из элементов характеризует мнение эксперта относительно преимущества одной альтернативы над другой. В общем виде такая матрица парных сравнений (МПС) записывается как $A = \|a_{ij}\|$, где a_{ij} , $i, j = 1:n$ – оценки преимущества i -й альтернативы над j -й в соответствии с выбранной оценочной шкалой, например, шкалой Саати [10] или другими шкалами, в том числе геометрической, логарифмической и с использованием нечетких оценок [11, 13]. Отметим, что $a_{ij} = 1$, если i -я и j -я альтернативы равнозначны, $a_{ij} > 1$, если i -я альтернатива превосходит j -ю, $a_{ji} = 1/a_{ij}$.

Задача обработки данных состоит в нахождении вектора приоритетов $w = (w_1, \dots, w_n)^T$. При этом для обеспечения достоверности результата матрица A должна быть согласованной, то есть суждения эксперта (или группы экспертов) не должны противоречить друг другу. Идеальная согласованность означает выполнение условий $a_{ij} = w_i/w_j$ и $a_{ij} = a_{ik}a_{kj}$ (транзитивность). Однако, при нахождении вектора приоритетов, как правило, осуществляется приближенный расчет $a_{ij} \approx w_i/w_j$.

Проведенный анализ литературы показывает, что в существующих методах обработки суждений эксперта по МПС с целью повышения согласованности используются различные метрики [14–17], а также отсутствует единый критерий оценки качества. В этом случае при сравнении методов возможны разные исходы, поскольку при различном наполнении МПС может быть эффективен тот или иной метод. Учитывая разнородность данных об эксплуатации ЭО и необходимость получить достоверный результат, задача оценки приоритетов может быть основана на иерархическом критерии оптимальности [18, 19], либо на привлечении группы экспертов, что предполагает использование нескольких МПС различной размерности.

Для повышения согласованности при получении вектора w применяются алгоритмы [14, 16, 20], которые требуют решения сложной многокритериальной задачи минимизации. Предлагается использовать более простой подход, позволяющий при этом учитывать преимущества различных методов оценки приоритетов (МОП) на основе комплексного критерия качества:

$$J_c \rightarrow \min \sum c_i^k, i = 1:m, k = 1:K, \quad (1)$$

где $C^k = (c_1^k, c_2^k, \dots, c_m^k)$ – вектор значений частных критериев качества применительно к k -му методу M_k ; K – число методов оценки приоритета; $c_i^k = f(A, w^k)$ – частный критерий качества.

Суть предлагаемого метода отражена на блок-схеме, представленной на рис. 2.

При анализе качества ориентируются, в первую очередь, на обеспечение согласованности суждений [10], которая оценивается отношением согласованности $CR = CI/RI$ (*consistency ratio*), где CI – индекс согласованности (*consistency index*) суждений для выбранной МПС, RI – индекс согласованности случайно сгенерированной МПС (*random index*).



Рис. 2. Блок-схема методики нахождения вектора приоритетов по МПС

Расчет CI может осуществляться через максимальное собственное значение матрицы:

$$CI = \sum_i \sum_j (a_{ij} w_i - n) / (n-1). \quad (2)$$

В качестве альтернативы может быть использован геометрический индекс согласованности [11]:

$$GCI = 2 \sum_{i < j} \left(\log a_{ij} - \log \frac{w_i}{w_j} \right)^2 / ((n-1)(n-2)). \quad (3)$$

Дополнительно при выборе критериев могут рассматриваться следующие количественные показатели:

$$QD(w) = \sum_i \sum_j (a_{ij} - w_i / w_j)^2, \quad (4)$$

$$ED(w) = \left(\sum_i \sum_j (a_{ij} w_j - w_i)^2 \right)^{1/2}, \quad (5)$$

$$NV(w) = \sum_i \sum_j I_{ij}, \quad (6)$$

где $QD(w)$ – квадратическое отклонение (*Quadratic deviation*) [14]; $ED(w)$ – Евклидово расстояние (*Euclidean distance*) как модификация QD , [16]; $NV(w)$ – число нарушений (*number of violations*) [16]; I_{ij} – нарушение соотношения между w и A :

$$I_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } (w_i < w_j) \text{ и } (a_{ij} > 1) \\ 1, & \text{если } (w_i > w_j) \text{ и } (a_{ij} < 1) \\ 1/2, & \text{если } (w_i \neq w_j) \text{ и } (a_{ij} = 1) \\ 1/2, & \text{если } (w_i = w_j) \text{ и } (a_{ij} \neq 1) \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (7)$$

Предлагается вести расчет составляющих критерия (1), начиная с показателя CR . При $CR > 0,1$ метод, по которому ищется решение, считается не удовлетворительным. В случае если все методы определены как неудовлетворительные, то выдаются рекомендации эксперту для уточнения МПС. Для этих целей также могут быть использованы методы подбора элементов МПС. Возможно назначение весовых коэффициентов для критериев, входящих в (1), чтобы показать их первостепенность. В случае групповых оценок методика применяется ко всем МПС, сформированным каждым отдельным экспертом, а по полученным весовым векторам находится общее значение w .

Различные МОП, отличающиеся использованием метрик для нахождения вектора w , решают оптимизационную задачу вида:

$$\sum_i \sum_j \delta(a_{ij}, w) \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$\text{при } \sum w_i = 1, w_i > 0.$$

К примеру, метод DLS (*direct least square*) [14] использует выражение $\delta^{DLS} = (a_{ij} - w_i / w_j)^2$, метод WLS (*weighted least square*) [21] – выражение $\delta^{WLS} = (w_j a_{ij} - w_i)^2$, метод LLS (*logarithmic least square*) [17] – выражение $\delta^{LLS} = (\log a_{ij} - \log w_i + \log w_j)^2$, метод LAE (*least absolute error*) [21] – выражение $\delta^{LAE} = |a_{ij} - w_i / w_j|$, метод $LLAV$ (*logarithmic least absolute value*) [21] – выражение $\delta^{LLAE} = |\log a_{ij} - \log w_i + \log w_j|$.

Также существуют методы нахождения взвешенной суммы столбцов МПС [10, 15], при этом нет строгой привязки к выбранной структуре МОП, что оставляет возможность для ее расширения на основе модификаций уже существующих и вновь разрабатываемых методов.

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ

Рассмотрим пример использования методики. В качестве методов нахождения w выбраны: аддитивная нормализация AN [15], EV [10], DLS , WLS , LLS , LAE , $LLAV$.

На рис. 3 приведены результаты оценки качества нахождения вектора приоритетов различными методами при случайных генерациях МПС по критериям CR , ED и NV . При решении задачи оптимизации (8) для расчета вектора w использован генетический алгоритм и средства пакета *Matlab*. Анализ подтверждает гипотезу об отсутствии абсолютного преимущества какого-либо из методов для различных произвольных МПС.

На рис. 4 представлен пример нахождения вектора приоритетов с использованием методики (рис. 2) по МПС, в которой приведены суждения эксперта о преимуществе критериев, характеризующих фактическую работоспособность энергооборудования: «Техническое состояние по контролируемым параметрам», «Остаточный ресурс», «Вероятность отказа».

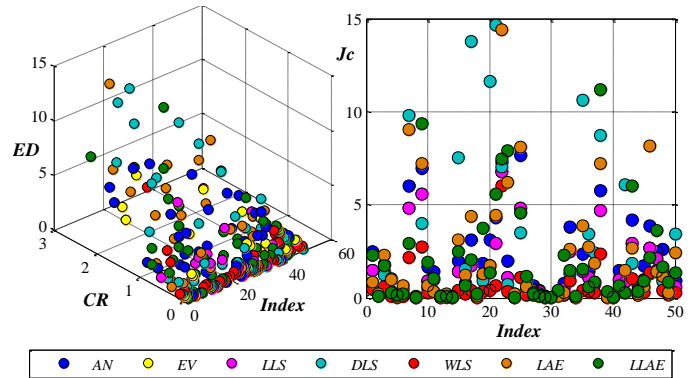


Рис. 3. Распределение оценок качества нахождения вектора w по случайно сгенерированным МПС 3-го порядка

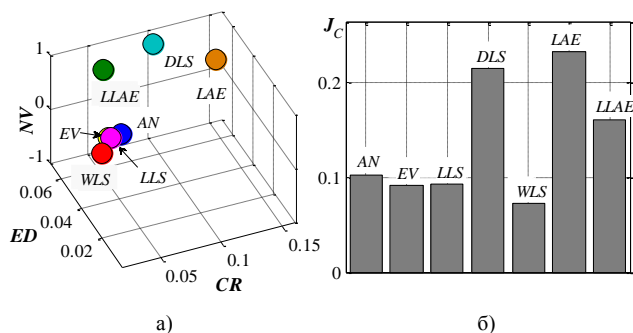


Рис. 4. Пример выбора оптимального метода пдля поиска вектора w : распределение значений частных (а) и комплексного (б) критериев качества

Для расчетного примера наиболее эффективным методом является метод WLS , с уровнем согласованности $CR=3,43\%$ и значениями $w=(0.55, 0.31, 0.14)$.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена методика, позволяющая осуществлять расчет вектора приоритетов по МПС различной размерности, построенных на основе суждений эксперта или группы экспертов. Результаты, полученные при помощи методики, могут быть использованы при формировании функций принадлежности параметров моделей диагностики ЭО экспертным способом в случае отсутствия необходимой статистической информации, а также при многокритериальном планировании очередности проведения ремонтно-эксплуатационных мероприятий и стратегии эксплуатации ЭО в целом [5]. Сравнивая результаты расчета со случайным методом из тестового множества МОП, можно наблюдать увеличение показателя качества J_c в 5–8 раз, что указывает на возможность повышение объективности оценок. При практической реализации методики в составе интеллектуальной системы ППР это позволит повысить достоверность оценки работоспособности ЭО и обеспечить своевременное принятие необходимых управленческих решений на уровне инженерно-технического персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. 2009. № 4. С. 29-34.
- [2] Кычкин А.В., Артемов С.А., Белоногов А.В. Распределенная система энергомониторинга реального времени на основе технологии IOT // Датчики и системы. 2017. № 8-9 (217). С. 49-55.
- [3] Елтышев Д.К. К вопросу о разработке интеллектуальной экспертно-диагностической системы для оценки состояния электротехнического оборудования // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 3 (35). С. 57-63.

- [4] Eltyshov D.K., Boyarshinova V.V. Intelligent Decision Support in the Electrical Equipment Diagnostics // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, Saint Petersburg, may 25-27 2016 / IEEE, 2016. pp. 157-160.
- [5] Планирование процесса эксплуатации электротехнического оборудования с использованием теории марковских процессов / А.Б. Петроченков, С.В.Бочкарёв, А.В. Ромодин, Д.К. Елтышев // Электротехника. 2011. № 11. С. 20а-24.
- [6] Eltyshov D.K., Khoroshev N.I. Diagnostics of the Power Oil-filled Transformer Equipment of Thermal Power Plants // Thermal Engineering. 2016. Vol. 63, № 8. pp. 558-566.
- [7] Хорошев Н.И. Интеллектуальная поддержка принятия решений при эксплуатации энергетического оборудования на основе адаптивного кластерного анализа // Системы Методы Технологии. 2016. № 3. С. 123-128.
- [8] Kychkin A.V., Mikriukov G.P. Applied data analysis in energy monitoring system // Problemele energeticii regionale. 2016. Vol. 2(31). pp. 84-92.
- [9] Кычкин А.В. Программно-аппаратное обеспечение сетевого энергоучетного комплекса // Датчики и системы. 2016. № 7 (205). С. 24-32.
- [10] Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 320 с. (95)
- [11] Ishizaka A. Labib A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process // Expert Systems with Applications. 2011. 38(11). pp. 14336-14345.
- [12] Cook W., Kress M. Deriving weights from pairwise comparison ratio matrices: An axiomatic approach // European Journal of Operational Research. 1988. №. 37(3). pp. 355-362.
- [13] Hepu D. Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison // International Journal of Approximate Reasoning. 1999. Vol. 21. pp. 215-231.
- [14] Siraj S., Mikhailov L., Keane J.A. Preference elicitation from inconsistent judgments using multi-objective optimization // European Journal of Operational Research. 2012. pp. 461-471.
- [15] Srdjevic B. Combining different prioritization methods in the analytic hierarchy process synthesis // Computers & Operations Research. 2005. Vol. 32. pp. 1897-1919.
- [16] Golany B., Kress M. A multicriteria evaluation of methods for obtaining weights from ratio-scale matrices // European Journal of Operational Research. 1993. Vol. 69, Issue 2. pp. 210-220. (125)
- [17] Crawford G., Williams C. A note on the analysis of subjective judgement matrices // Journal of Mathematical Psychology. 1985. Vol. 29, Issue 4. pp. 387-405. (124)
- [18] Елтышев Д.К. Выбор приоритетов при обслуживании, модернизации и обеспечении безопасности объектов энергетики // Энергобезопасность и энергосбережение. 2017. № 2. С. 5-10.
- [19] Бочкарев С.В., Елтышев Д.К. Методика принятия оптимальных решений при ремонте высоковольтного электротехнического оборудования // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 142-146.
- [20] Mikhailov L. Multiple criteria optimisation approach to deriving priorities in Analytic hierarchy process // Proceedings 7th ISAHp, 2003. Bali, Indonesia.
- [21] Choo E.U., Wedley W.C. A common framework for deriving preference values from pairwise comparison matrices // Computers and Operations Research. 2004. Vol. 31, № 6. pp. 893-908.