

И. А. Щербатов, канд. техн. наук, shcherbatovia@mpei.ru,
Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт"

Формализация неопределенности внешней среды при эксплуатации энергетического оборудования

Условия эксплуатации оборудования объектов энергетики оказывают влияние на его техническое состояние. Эти условия определяются состоянием внешней (окружающей) среды. Отклонения параметров окружающей среды от требуемых (нормативных) значений могут ускорять негативные тенденции, приводящие к отказам, авариям и, соответственно, экономическому ущербу от простоя и восстановления надлежащего технического состояния энергетического оборудования. Поэтому учет состояния внешней среды является важным аспектом решения задач мониторинга, диагностики и прогнозирования технического состояния, а также задач управления и поддержки принятия решений при эксплуатации оборудования объектов энергетики. Внешняя среда характеризуется наличием различных видов неопределенности. Отличающиеся неопределенности внешней среды определяют необходимость выбора или коррекции способа достижения цели управления или принятия решения. Поэтому в работе предложено формализованное описание неопределенностей внешней среды. Синтезированы операции для формализации состояний, отличающихся от "типовых", получаемых, например, на этапе проектирования системы диагностики или управления энергетическим оборудованием. На основе этого реализован способ оперативной оценки состояний внешней среды без опроса экспертов и ЛПР на основе синтеза ускоренной процедуры. В качестве математического аппарата формализации знаний о неопределенностях различных видов и субъективизма, присущего мнениям экспертов предметной области, обоснован выбор теории нечетких множеств. Формализовано понятие состояния внешней среды и предложены операции для определения ее типовых состояний. Для учета различных видов неопределенности при описании текущего состояния внешней среды предложен механизм модификаторов. Модификаторы позволяют существенно упростить расчеты при формализации состояний внешней среды для применения в системах диагностики и управления энергетическим оборудованием. Рассмотренные расчетные примеры показывают основные возможности предложенного подхода. Результаты применения разработанного подхода позволяют говорить о целесообразности его применения для решения задачи формализации состояния внешней среды при эксплуатации энергетического оборудования в условиях неопределенности.

Ключевые слова: неопределенность, внешняя среда, энергетика, оборудование энергетики, теория нечетких множеств

Введение

Внешняя (окружающая) среда оказывает влияние на процесс эксплуатации энергетического оборудования и, как следствие, на его техническое состояние. В качестве основных факторов, влияющих на условия функционирования оборудования энергетики, можно выделить климатические (температура, влажность, запыленность), человеческие (ошибки при монтаже, некачественный осмотр, нарушение правил эксплуатации), механические (удары, вибрация). Эксплуатация оборудования должна проводиться в строгом соответствии с установленными правилами, требованиями ГОСТ, СНИП и другой нормативно-технической документации [1]. Однако не всегда происходит следование этому требованию. Например, в отчете [2] указано, что наблюдается увеличение аварий и отказов (по объектам электроэнергетики) из-за неустранения дефектов, выявленных при осмотрах, а также невыполнения необходимых объемов проверок, при этом причинами около 5 % всех аварий являются ошибочные или не-

правильные действия оперативного персонала. Неблагоприятные погодные условия также являются существенным фактором изменения технического состояния энергетического оборудования. Поэтому необходимо знать состояние внешней среды в конкретный момент времени, что позволит выбрать и реализовать управляющее воздействие, направленное на компенсацию негативного влияния. Задача описания состояния внешней среды является крайне сложной. Вместе с тем влияние внешней среды на техническое состояние энергетического оборудования проявляется через определенные негативные воздействия [3]. Поэтому необходимо формализовать знания о негативных факторах внешней среды, оказывающих влияние на техническое состояние и надежность энергетического оборудования.

Существует значительное число работ, в которых предложены различающиеся подходы к описанию влияния, которое оказывает внешняя среда на функционирующее энергетическое оборудование и которое приводит к изменению его технического состояния. В основ-

ном все работы посвящены оценке влияния или учета при принятии решения конкретных негативных факторов (воздействий).

Например, в работе [4] предлагается оценивать функциональную уязвимость как условную вероятность потери системой способности выполнять отдельные функции (наличие дефекта, снижающего эффективность функционирования единицы энергетического оборудования). Этот подход позволяет формировать дерево сценариев отказов системы и оценивать уязвимости технической системы, возникающие в результате внешних (инициирующих) воздействий. В целом достаточно часто при проведении технической диагностики в системах противоаварийной защиты используются методы построения деревьев принятия решений [5]. Оценка влияния температуры окружающей среды и условий эксплуатации на производительность газотурбинной электростанции приводится в статье [6]. Учет внешних условий функционирования как фактора, оказывающего влияние на преждевременное старение и износ, а также увеличение интенсивности отказов оборудования, реализован в работе [7]. Внешние факторы выявляются из ретроспективных данных на основе методов обработки больших данных и составления правил, реализующих механизм накопления влияния с течением времени. Воздействие внешней среды можно фиксировать опосредованно с использованием систем мониторинга и диагностики состояния оборудования, например, для сетей Smart Grid существует двухэтапная процедура, заключающаяся в сборе информации и анализе стратегий обслуживания оборудования и модуле обнаружения дрейфов режимов [8]. Важность оценивания состояния внешней среды и условий функционирования турбин отмечена в работе [9], трансформаторов — в работе [10] и т. д.

Внешняя среда посредством воздействий, оказываемых на оборудование энергетики, влияет на его техническое состояние. Учет состояния важен при принятии решений, направленных на поддержание оборудования в надлежащем техническом состоянии, а также на снижение рисков отказов и аварий. При этом внешняя среда является источником существенной неопределенности. Нередко отсутствует возможность оценки состояния внешней среды с использованием традиционных методов. Однако для этой цели могут быть при-

влечены эксперты предметной области, знания которых позволяют снизить неопределенность и, например, установить набор "типовых" состояний внешней среды, в которой функционирует энергетическая система. Иначе говоря, эксперты могут выделить те типы неопределенности внешней среды, которые являются существенными с точки зрения негативного влияния, оказываемого ими на конкретную единицу оборудования. При этом для формирования знаний экспертов наиболее подходящим математическим аппаратом является теория нечетких множеств [11]. Необходимо отметить, что помимо формализации типов неопределенности внешней среды следует поставить им в соответствие конкретные способы управления, обеспечивающие снижение негативного влияния и обеспечение требуемого режима работы энергетического оборудования.

Особенности задачи формализации неопределенностей внешней среды

Энергетическое оборудование функционирует во внешней среде при наличии неопределенностей различных видов, например, температуры окружающей среды. Обозначим $\Xi = \{\xi_1, \dots, \xi_m\}$ — множество неопределенностей внешней среды, сопровождающих процессы управления или принятия решений в энергетической системе. Наличие различных неопределенностей влияет на выбор способа достижения цели управления или на принятие решения (способа управления единицей энергетического оборудования). Обозначим множество способов управления единицей оборудования $\Gamma = \{\gamma_1, \dots, \gamma_k\}$. Под состоянием внешней среды будем понимать присутствующий набор неопределенности из Ξ в конкретный момент времени.

Тогда для решения задачи выбора способа управления единицей энергетического оборудования в условиях неопределенности внешней среды необходимо решить ряд взаимосвязанных подзадач:

- предложить формализованное описание состояния внешней среды, обладающей неопределенностями различных видов, принадлежащих множеству Ξ ;
- на основании описания состояния внешней среды синтезировать операции для получения состояний, отличающихся от "типовых" состояний, получаемых, например, на этапе

проектирования системы управления энергетическим оборудованием;

- с использованием синтезированных операций получения не типовых состояний и формализованного описания неопределенностей внешней среды предложить способ оперативной оценки состояний без опроса экспертов и ЛПР на основе синтеза ускоренной процедуры;
- предложить способ определения требуемого управляющего воздействия с учетом сформированной оценки текущего состояния внешней среды.

Учет субъективности мнений экспертов при формализации состояний внешней среды

Опытный эксперт предметной области обладает знаниями, позволяющими ему эффективно действовать в условиях наличия негативных факторов внешней среды. Эти знания формализуются с использованием теории нечетких множеств. Однако в этом случае возникает дополнительная неопределенность, обусловленная субъективностью знаний конкретного эксперта, их информированностью, опытом, эмоциональным состоянием и пр. и "размытостью" теории нечетких множеств как математического аппарата, что сказывается на близости оценок реальному состоянию внешней среды. Поэтому при задании элементов множества Ξ следует учесть данный аспект.

Пусть A — нечеткое подмножество множества X с функцией принадлежности $\mu_A(x)$, $d(A)$ — мера нечеткости A , и существует ряд требований к d (аксиомы Де Луки-Термини) [12]:

(Т.1) $d(A) = 0$, тогда и только тогда, когда A — четкое подмножество, т. е. $\mu_A(x) = 0$ или $\mu_A(x) = 1, \forall x \in X$;

(Т.2) $d(A)$ достигает максимального значения тогда и только тогда, когда $\mu_A(x) = 0,5, \forall x \in X$;

(Т.3) $d(A) \geq d(A^*)$: $\begin{cases} \mu_{A^*}(x) \geq \mu_A(x), \mu_A(x) \geq 0,5; \\ \mu_{A^*}(x) \leq \mu_A(x), \mu_A(x) \leq 0,5; \end{cases}$

(Т.4) $d(A) = d(\bar{A})$, где $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$ (\bar{A} — дополнение к A).

Мера $d(\cdot)$ является количественным показателем, который позволяет определить состояние внешней среды, описываемое нечетким подмножеством, наиболее близкое к реальному. Например, сравнивая два нечетких множества с использованием меры $d(\cdot)$, можно выбрать то, которое является более предпочтительным с

учетом субъективности мнений экспертов, знания которых использовались для оценки текущего состояния внешней среды. В работе [13] обосновано применение меры Коско для вычисления $d(\cdot)$ [14]:

$$d_{KS}(A) = \frac{|A \cap \bar{A}|}{|A \cup \bar{A}|}, \quad (1)$$

где $|A| = \sum_{x \in X} \mu_A(x)$ — сумма значений функций принадлежности.

Формализация неопределенностей внешней среды

Внешняя среда, в которой функционирует энергетическая система, является источником существенной неопределенности. Все свойства внешней среды, информация о которых не доступна, не поддается измерению или может быть оценена (измерена) только частично, относятся к множеству неопределенностей Ξ .

Определение 1. Состояние внешней среды $S_E(t^*)$ в момент времени t^* в полной мере характеризуется подмножеством $\Xi^* \in \Xi$ в этот момент времени, т. е. имеет место соответствие $E_S: S_E \rightarrow \Xi$, где E_S — декартово произведение $S_E \times \Xi$.

Тогда по определению нечеткое подмножество $\hat{\Xi}_1$ множества Ξ характеризуется функцией принадлежности $\mu_{\Xi}: \Xi \rightarrow [0; 1]$, которая ставит в соответствие каждому элементу Ξ число $\mu_{\Xi}(\xi)$ из интервала $[0; 1]$, характеризующее степень принадлежности элемента ξ подмножеству $\hat{\Xi}_1$ [15]. Напомним, что множеством α -уровня нечеткого множества $\hat{\Xi}_1$ является множество $\hat{\Xi}_{\alpha,1}: \hat{\Xi}_{\alpha,1} = \{\xi | \mu_{\Xi}(\xi) \geq \alpha\}$ [15].

Определение 2. Нечеткое дискретное подмножество $\bar{\Xi}^* = \{\xi_1/\mu_{\bar{\Xi}^*}(\xi_1); \dots; \xi_k/\mu_{\bar{\Xi}^*}(\xi_k)\} \in \Xi$ будем называть состоянием неопределенности внешней среды.

Типовые операции над формализованными неопределенностями внешней среды

В случае, если существует возможность задать несколько "типовых" состояний внешней среды $\Xi_T \subset \Xi$ (характеризующихся наличием конкретного набора неопределенностей), то, используя операции над нечеткими множествами, можно породить более сложные со-

стояния внешней среды на основе "простых" ситуаций из Ξ_T (для дискретного задания нечетких множеств состояний неопределенности внешней среды): дополнение $\hat{\Xi}_1; \mu_{\hat{\Xi}} = 1 - \mu_{\Xi}$ (позволяет сформировать состояние, противоположное текущему, соответствует термину "НЕ"); объединение $(\Xi_1 \cup \Xi_2); \mu_{\Xi_1 + \Xi_2} = \max(\mu_{\Xi_1}; \mu_{\Xi_2})$ (позволяет получить состояние среды, которое объединяет два типовых состояния).

Учитывая определения из теории нечетких множеств, сформулируем ряд утверждений, которые являются прямым следствием определения 2.

Определение 3. Состояние неопределенности внешней среды $\hat{\Xi}_1$ включается в состояние неопределенности внешней среды $\hat{\Xi}_2$ (обозначим это $\hat{\Xi}_1 \subseteq \hat{\Xi}_2$), если $\forall \xi \mu_{\hat{\Xi}_1}(\xi) \leq \mu_{\hat{\Xi}_2}(\xi)$.

Определение 4. Состояние неопределенности внешней среды $\hat{\Xi}_1$ равно состоянию неопределенности внешней среды $\hat{\Xi}_2$ (обозначим это $\hat{\Xi}_1 = \hat{\Xi}_2$), если $\forall \xi \mu_{\hat{\Xi}_1}(\xi) = \mu_{\hat{\Xi}_2}(\xi)$.

Поскольку обычно элементами множества неопределенностей Ξ являются лингвистические (вербальные, на ограниченном множестве естественного языка) описания, то для удобства обозначим их целыми числами, которые соответствуют порядковому номеру элемента в множестве, а функции принадлежности приравняем к единице, т. е. сформируем обыкновенное (четкое) подмножество. Таким образом, в общем виде $\hat{\Xi}' = \{1/\mu_1; \dots; k/\mu_k\}$, $\mu_1 = \dots = \mu_k = 1$, $|\Xi^*| = k, k \in N$. Получим "условные" функции принадлежности $\mu_i, i = \overline{1, k}$ (необходимые для упорядочивания элементов по μ_i) следующим образом: $\mu_i = 1/i, i = \overline{1, k}$, тогда $\Xi' = \{1/1; \dots; k/1/k\}$.

Определение 5. α -состояние неопределенности внешней среды — четкое множество α -уровня нечеткого подмножества $\hat{\Xi}^*$, такое что $\hat{\Xi}_\alpha = \{\xi | \mu_{\Xi^*}(\xi) \geq \alpha\}$.

По определению α -уровня нечеткого множества $\hat{\Xi}_\alpha^*$ — нечеткое подмножество, для которого выполнено условие $\forall \xi_\alpha^* \mu_{\hat{\Xi}_\alpha^*}(\xi_\alpha^*) = 1$. Условимся, что число α -уровней конечно, т. е. $\alpha \in \{\alpha_1; \dots; \alpha_k\}$. Для $\hat{\Xi}' = \{1/1; \dots; k/1/k\}$ $\alpha_i = 1/i, i = \overline{1, k}$.

Определение 6. Любое α -состояние неопределенности среды будем называть типовым состоянием неопределенности среды: $\Xi_T = \Xi_\alpha^* \forall \alpha > 0$.

Следствие 1. Подмножество Ξ_T раскладывается по множествам уровня $\alpha > 0$: $\Xi_T = \sum_{\alpha} \alpha \Xi_\alpha^*$.

Следствие 2. Общее число типовых состояний неопределенности внешней среды равно числу элементов конечного подмножества Ξ^* , т. е. $|\Xi^*| = k$.

Следствие 3. Для типовых состояний неопределенности внешней среды справедливо $\Xi_{T,1} \cup \dots \cup \Xi_{T,k} = \Xi$.

Задавая функции принадлежности для элементов различных типовых состояний, получаем различные виды неопределенности внешней среды, в которых решается задача достижения цели. Для любого нечеткого подмножества $\Xi' \in \Xi$, определенного на элементах подмножества типовых состояний $\Xi_{T,i}$, будет справедливо $\Xi' \subseteq \Xi_{T,i}$.

Условимся, что исходное множество неопределенностей внешней среды упорядочено требуемым образом, тогда полное множество типовых состояний неопределенности можно получить, определив все сочетания для $\Xi (C_i^k$ — сочетание из Ξ по i элементов), число которых равно $\sum_{i=1}^k |C_i^k|$.

Модификаторы типовых состояний неопределенности внешней среды

Информация о наличии или отсутствии конкретного вида неопределенности может существенным образом сократить вычислительные ресурсы и время, затрачиваемое на оценку. Поэтому если такая информация может быть получена, то существует возможность применения ряда модификаторов типовых состояний внешней среды, обеспечивающих упрощение проводимых вычислений.

Определение 7. Модификатором типового состояния внешней среды называется множество $M = \{m_i\}, i = \overline{1, k}$, элементами которого являются бинарные оценки присутствия ($m_i = 1$) или отсутствия ($m_i = 0$) соответствующего вида неопределенности из $\Xi = \{\xi_i\}, i = \overline{1, k}$, для текущего состояния неопределенности внешней среды Ξ^* .

Определение 8. Нечетким модификатором типового состояния внешней среды $M = \{\xi_i; \mu_i = m_i\}, i = \overline{1, k}$, является нечеткое множество, элементами которого являются виды неопределенности из Ξ , а в качестве функций принадлежности выступают значения m_i .

Следствие 4. Множества $M = \{m_i\}, i = \overline{1, k}$, и $\Xi = \{\xi_i\}, i = \overline{1, k}$, являются равномошными, т. е. для них справедливо равенство $|M| = |\Xi_{\alpha_{\max}}^*| = k$.

Утверждение. Любое типовое состояние внешней среды $\Xi_T \in \Xi$ может быть получено из $\Xi_{\alpha_{\max}}^*$ с использованием соответствующего модификатора $M' \subset M$.

Доказательство. $\Xi_T \subseteq \Xi_{\alpha_{\max}}^*$ (в смысле определения 3) и $\Xi_{\alpha_{\max}}^* = \Xi$ (в смысле определения 4), где $\alpha_{\max} = \max(\alpha_1; \dots; \alpha_k)$, то $\Xi_{T, \max} = \Xi_{\alpha_{\max}}^*$ (в силу определения 6).

Исходя из определения функции принадлежности $\mu = 0$, эксперт уверен в том, что конкретный элемент ξ_i множества всех видов неопределенности внешней среды Ξ не принадлежит нечеткому подмножеству, характеризующему типовое состояние неопределенности внешней среды ($\mu = 1$ в противном случае). Для $\Xi_{\alpha_{\max}}^*$ по определению 7 может быть получен модификатор $M' = \{m_i\}$, для которого выполнено следствие 4.

Перейдем к нечеткому множеству $\hat{\Xi}_{\alpha_{\max}}^* = \{\xi_i / \mu(\xi_i)\}$ и получим нечеткий модификатор типового состояния внешней среды $M' = \{\xi_i; m'_i\}$.

Найдем произведение нечетких множеств $\hat{\Xi}_{\alpha_{\max}}^*$ и \hat{M}' :

$$\hat{\Xi}_{\alpha_{\max}}^* \hat{M}' = \begin{cases} \mu(\xi_i), & \text{если } m_i = 1; \\ 0, & \text{если } m_i = 0; \end{cases}$$

$$|\hat{\Xi}_{\alpha_{\max}}^* \hat{M}'| = k - \sum(m = 0).$$

Таким образом, в $\Xi_{\alpha_{\max}}^* M'$ останутся элементы ξ_i , для которых на месте i в множестве модификаторов $M' \subset M$ $\mu(\xi_i) \neq 0$, т. е. только виды неопределенности, которые присутствуют во внешней среде. Утверждение доказано.

Следует отметить, что для нечетких множеств $\hat{\Xi}$ и \hat{M} мощности их будут не равны, т. е. $\sum \text{Count}(\hat{\Xi}) \neq \sum \text{Count}(\hat{M})$, так как по определению $\sum \text{Count}(\hat{A}) \stackrel{\Delta}{=} \sum_{x \in X} \mu_A(x)$, где $\stackrel{\Delta}{=}$ — операция алгебраического суммирования и последующего округления до ближайшего целого [15].

Следствие 5. Нечеткий модификатор применим к состоянию неопределенности внешней среды, полученному с использованием арифметических операций над нечеткими множествами.

Необходимо отметить, что выбор конкретного способа управления $\gamma' \in \Gamma$ в зависимости от неопределенностей внешней среды может быть задан, например, нечетким от-

ношением $\hat{R}2$, представляющим собой подмножество декартова произведения $\Gamma \times \Xi$, характеризующееся функцией принадлежности $\mu_{\hat{R}2}(\gamma, \xi): \Gamma \times \Xi \rightarrow [0, 1]$ (мера уверенности выполнения отношения $\hat{\gamma}_1 \hat{R}2 \xi$).

Расчетные примеры

Рассмотрим примеры для эксплуатации энергетического оборудования в условиях неопределенности внешней среды. Когда состояние среды может быть оценено косвенно, с использованием субъективных суждений ЛПР или экспертов предметной области.

Пример 1. Пусть во внешней среде, в которой функционирует энергетическое оборудование, присутствуют следующие неопределенности: ξ_1 — нагрузка; ξ_2 — температурный режим; ξ_3 — влажность; ξ_4 — запыленность. Пусть заданы нечеткие подмножества $\hat{\Xi}_{T1} = \{\xi_1/0, 9; \xi_2/0, 4; \xi_3/0, 1; \xi_4/0, 2\}$ ("возможно изменение нагрузки при нормальных климатических условиях") и $\hat{\Xi}_{T2} = \{\xi_1/0, 2; \xi_2/0, 1; \xi_3/0, 9; \xi_4/0, 3\}$ ("высокая влажность воздуха", при фактическом отсутствии других неопределенностей), выражающие экспертное мнение о текущих условиях эксплуатации конкретной единицы оборудования. С использованием формулы (1) рассчитаем нечеткую энтропию $d_{KS1}(\Xi) = 0, 250$, $d_{KS2}(\Xi) = 0, 212$, т. е. Ξ_2 более предпочтительно, поскольку $d_{KS2}(\Xi) < d_{KS1}(\Xi)$, чем ближе к 0, тем более определено, в силу требования (Т.1).

Пример 2. Пусть типовые состояния среды заданы следующим образом: $\hat{\Xi}_{T1} = \{\xi_3/0, 9\}$ (высокая влажность воздуха) и $\hat{\Xi}_{T2} = \{\xi_4/0, 8\}$ (высокая запыленность помещения). Тогда с использованием типовых операций, описанных выше, получим:

- $\bar{\Xi}_{T3} = \{\xi_3/0, 1\}$ — состояние "невысокая влажность воздуха";
- $\bar{\Xi}_{T1} \cup \bar{\Xi}_{T2} = \{\xi_3/0, 9; \xi_4/0, 8\}$ — состояние "высокая влажность воздуха и высокая запыленность помещения".

Пример 3. Используем исходные данные из примера 1. Преобразуем $\hat{\Xi}_{T1}$ в множество $\{1/1; 2/0, 5; 3/0, 33; 4/0, 25\}$ (сформируем условные функции принадлежности) и, соответственно, $\alpha \in \{1; 0, 5; 0, 33; 0, 25\}$, тогда получим типовые состояния неопределенности внеш-

ней среды $\Xi_{T,1} = \{1\}$; $\Xi_{T,2} = \{1; 2\}$; $\Xi_{T,3} = \{1; 2; 3\}$; $\Xi_{T,4} = \{1; 2; 3; 4\}$ (легко заметить, что следствие 3 выполнено).

Приведем интерпретацию полученных результатов. Для типового состояния неопределенности внешней среды $\hat{\Xi}_{T1}$ имеем, что формализации в определенном виде может быть подвержена только неопределенность, связанная с изменением нагрузки. Тогда, например, для типового состояния $\hat{\Xi}_{T3}$ доступны для формализации три вида неопределенности внешней среды.

Пример 4. Для исходных данных из примера 1 имеем четыре вида неопределенности $\{\xi_1; \xi_2; \xi_3; \xi_4\}$ и по следствию 2 число типовых состояний неопределенности внешней среды равно 4, т. е. $\{\xi_1\}$; $\{\xi_1; \xi_2\}$; $\{\xi_1; \xi_2; \xi_3\}$; $\{\xi_1; \xi_2; \xi_3; \xi_4\}$. Если множество будет упорядочено другим способом, например, $\{\xi_2; \xi_1; \xi_3; \xi_4\}$, то в смысле определения 6 к типовым будут отнесены следующие состояния: $\{\xi_2\}$, $\{\xi_2; \xi_1\}$, $\{\xi_2; \xi_1; \xi_3\}$ и $\{\xi_2; \xi_1; \xi_3; \xi_4\}$. Это приведет к необходимости нового задания отношения \hat{R}_2 , поэтому следует изменить алгоритм расчета, что не допустимо. Однако теоретически возможно, что, например, одновременно могут существовать не только множество $\{\xi_1; \xi_2; \xi_3\}$, но и $\{\xi_3\}$, а также $\{\xi_2\}$.

Пример 5. Для исходных данных из примера 1 имеем $\{\xi_1; \xi_2; \xi_3; \xi_4\}$, тогда возможные сочетания элементов будут: $C_1^4 - \{\xi_1; \xi_2; \xi_3; \xi_4\}$; $C_2^4 - \{\xi_1; \xi_2\}$, $\{\xi_1; \xi_3\}$, $\{\xi_1; \xi_4\}$, $\{\xi_2; \xi_3\}$, $\{\xi_2; \xi_4\}$, $\{\xi_3; \xi_4\}$; $C_3^4 - \{\xi_1; \xi_2; \xi_3\}$, $\{\xi_1; \xi_2; \xi_4\}$, $\{\xi_1; \xi_3; \xi_4\}$, $\{\xi_2; \xi_3; \xi_4\}$; $C_4^4 - \{\xi_1; \xi_2; \xi_3; \xi_4\}$. Число типовых состояний неопределенности Ξ_T равно $|C_1^4| + |C_2^4| + |C_3^4| + |C_4^4| = 4 + 6 + 4 + 1 = 15$.

Пример 6. Для исходных данных из примера 1 имеем $\hat{\Xi} = \{\xi_1/0,9; \xi_2/0,4; \xi_3/0,1; \xi_4/0,2\}$. Выберем модификатор типового состояния внешней среды в виде $\{1; 1; 1; 0\}$ и получим нечеткий модификатор $\hat{M} = \{\xi_1/1; \xi_2/1; \xi_3/1; \xi_4/0\}$, следовательно, $\hat{\Xi}M = \{\xi_1/0,9; \xi_2/0,4; \xi_3/0,1\}$.

Выберем модификатор типового состояния внешней среды в виде $\{1; 0; 0; 1\}$ и получим нечеткий модификатор $M = \{\xi_1/1; \xi_2/0; \xi_3/0; \xi_4/1\}$, следовательно, $\hat{\Xi}M = \{\xi_1/0,9; \xi_4/0,2\}$, $\sum Count(\hat{\Xi}) = 2, \sum Count(\hat{M}) = 3$.

Заключение

Описание неопределенностей внешней среды с использованием теории нечетких множеств

позволяет формализовать знания экспертов в этой области. Перечень основных типовых состояний внешней среды с учетом характерных неопределенностей различных типов формируется на этапе проектирования. Это обеспечивает возможность реализации управления функционированием энергетического оборудования с учетом рассматриваемого аспекта. Модификаторы состояний являются простым способом быстрой оценки состояния внешней среды в автоматизированном режиме без привлечения экспертов предметной области. Оперативный персонал (ЛПР), не обладая достаточной квалификацией, может проводить учет неопределенностей внешней среды при управлении оборудованием. В качестве дальнейшего направления работы следует отметить необходимость синтеза процедуры оценки состояния внешней среды, когда присутствуют вероятности возникновения определенных событий во внешней среде, способных оказывать влияния на эксплуатацию энергетического оборудования.

Список литературы

1. Яшура А. И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Справочник. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2017. 504 с.
2. Основные результаты функционирования объектов электроэнергетики в 2015 году / Под ред. заместителя министра энергетики Российской Федерации А. В. Черезова. М., 2016. 72 с.
3. Махутов Н. А., Резников Д. О. Оценка уязвимости технических систем и ее место в процедуре анализа риска // Проблемы анализа риска. 2008. № 3. С. 72–85.
4. Sum R. Influence of environmental factors on component/equipment reliability // Indian Journal of Engineering & Material Sciences. 1998. Vol. 5. P. 121–123.
5. Liu C., Rather Z. H., Chen Z., Bak C. L. An overview of decision tree applied to power systems // International Journal of Smart Grid and Clean Energy. 2013. Vol. 2, N. 3. P. 413–419.
6. Rahman M. M., Thamir K., Kadirgama K., Mamat R., Bakar R. A. Influence of Operation Conditions and Ambient Temperature on Performance of Gas Turbine Power Plant // Advance Material Research. 2011. P. 3007–3013.
7. Cliteur G. J., Wetzter J. M. Condition assessment of power transmission and distribution components. 2001. URL: http://www.cired.net/publications/cired2001/1_26.pdf (дата обращения: 27.02.2019).
8. Khalil S. S., Abu-Rub H. Smart Grid Condition Assessment: Concepts, Benefits, and Developments // Power Electronics and Drives. 2016. Vol. 1, N. 2. P. 147–163.
9. Peng S., Jian L., Yuanhong W., Yonglong Y., Tianyan J. Condition assessment of wind turbine generators based on cloud model // Proceedings of the IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD). 2013. P. 146–151.
10. Wang M., Vandermaar A. J. Review of condition assessment of power transformers in service // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2002. Vol. 18, N. 5. P. 8–17.
11. Щербатов И. А. Управление сложными слабоформализуемыми многокомпонентными системами. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2015. 268 с.

12. De Luca A., Termini S. A definition of nonprobabilistic entropy in the setting of fuzzy sets theory // Information and Control. № 20(4). 1972. P. 301–312.

13. Щербатов И. А. Глобальная цель сложной слабоформализуемой технической системы. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2017. 100 с.

14. Kosko B. Fuzzy Entropy and Conditioning // Information Sciences. 1986. N. 40. P. 165–174.

15. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.

16. Zadeh L. Fuzzy Probabilities // Information Processing & Management. 1984. Vol. 20, N. 3. P. 363–372.

Formalization of the External Environment Uncertainty in the Power Equipment Operating

I. A. Shcherbatov, shcherbatovia@mpei.ru,

Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250, Russian Federation

Corresponding authors: Shcherbatov Ivan A., Associate Professor of the Department "Automated control systems of thermal processes", Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: shcherbatovia@mpei.ru

Accepted on March 25, 2019

Abstract

Operating conditions of the power facilities equipment have an impact on its technical condition. These conditions are determined by the state of the external (environment) environment. Deviations of environmental parameters from the required (normative) values can accelerate negative trends leading to failures, accidents and, accordingly, economic damage from downtime and restoration of the proper technical condition of power equipment. Therefore, taking into account the state of the environment is an important aspect of solving the problems of monitoring, diagnosis and forecasting of technical condition, as well as solving the problems of management and decision support in the operation of energy facilities. The external environment is characterized by different types of uncertainty. The different uncertainties of the external environment determine the need to choose or correct the way to achieve the goal of management or decision-making. Therefore, the paper proposes a formalized description of the environment state, which has uncertainties of different types. Synthesized operations to obtain states different from the "typical" obtained, for example, at the design stage of the diagnostic system or control of power equipment. On the basis of this implemented a method of rapid assessment of the external environment without a survey of experts based on the synthesis of the accelerated procedure. The choice of fuzzy set theory is justified as a mathematical tool for formalizing uncertainties of different types and subjectivism inherent in the opinions of domain experts. The concept of the environment state is formalized and typical operations for determining its typical states are proposed. To take into account the different types of uncertainty in the description of the current state of the environment, a modifier mechanism is proposed. Modifiers can significantly simplify calculations in the formalization of environmental conditions for use in diagnostic systems and control of power equipment. The considered computational examples show the main features of the proposed approach. The results of the application of the developed approach suggest the feasibility of its application to solve the problem of formalization of the environment in the operation of power equipment under uncertainty.

Keywords: uncertainty, external environment, energy equipment, fuzzy set theory

For citation

Shcherbatov I. A. Formalization of the External Environment Uncertainty in the Power Equipment Operating, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 405–411.

DOI: 10.17587/mau.20.405-411

References

1. Jashhura A. I. Power equipment maintenance and repair system. Guide, Moscow, Publishing house of the NC ENAS, 2017. 504 p. (in Russian).
2. The main results of the operation of electric power facilities in 2015, Under the ed. of the Deputy Minister of energy of the Russian Federation, Moscow, 2016, 72 p. (in Russian).
3. Mahutov N. A., Reznikov D. O. *Problems of Risk Analysis*, 2008, no. 3, pp. 72–85 (in Russian).
4. Sum R. *Indian Journal of Engineering & Material Sciences*, 1998, vol. 5, pp. 121–123.
5. Liu C., Rather Z. H., Chen Z., Bak C. L. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 2013, vol. 2, no. 3, pp. 413–419.
6. Rahman M. M., Thamir K., Kadirgama K., Mamat R., Bakar R. A. *Advance Material Research*, 2011, pp. 3007–3013.
7. Cliteur G. J., Wetzler J. M. Condition assessment of power transmission and distribution components. 2001, available

at: http://www.cired.net/publications/cired2001/1_26.pdf (date of access: 27.02.2019).

8. Khalil S. S., Abu-Rub H. *Power Electronics and Drives*, 2016, vol. 1, no. 2. pp. 147–163.

9. Peng S., Jian L., Yuanhong W., Yonglong Y., Tianyan J. Condition assessment of wind turbine generators based on cloud model, *Proceedings of the IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, 2013, pp. 146–151.

10. Wang M., Vandermaar A. J. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, vol. 18, no. 5, pp. 8–17.

11. Shcherbatov I. A. Control of complex poorly formalized multicomponent systems. Rostov n/D, Publishing House of SSC RAS, 2015, 268 p. (in Russian).

12. De Luca A., Termini S. *Information and Control*, 1972, no. 20(4), pp. 301–312.

13. Shcherbatov I. A. The global goal of a complex poorly formalized technical system. Astrakhan, Publishing House of ASTU, 2017, 100 p. (in Russian).

14. Kosko B. *Information Sciences*, 1986, no. 40, pp. 165–174.

15. Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate decision-making, Moscow, Mir, 1976, 165 p. (in Russian).

16. Zadeh L. *Information Processing & Management*, 1984, vol. 20, no. 3, pp. 363–372.