



## ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

### Система управления техническими активами предприятий электросетевого комплекса

Хальясмаа А. И., инж., Дмитриев С. А., Кокин С. Е., кандидаты техн. наук

**ФГАОУ ВПО “Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина”, Екатеринбург**

Рассмотрены вопросы оценки состояния электрооборудования для формирования системы управления техническими активами предприятий электросетевого комплекса. Определена исходная выборка данных технической диагностики с целью оценки технического состояния электрооборудования электрических подстанций на основе обработки экспертных оценок с помощью нечетких множеств.

**Ключевые слова:** предприятия электросетевого комплекса, оценка технического состояния, технические активы, экспертные оценки, нечеткие множества.

Для повышения технической и экономической эффективности работы большинство предприятий электросетевого комплекса, на балансе которых состоят электрические подстанции (ПС) 35 кВ и выше, активно внедряют автоматизированные системы управления техническими активами. Это обусловлено стремлением не только снизить риски, связанные с отказами и отключениями электрооборудования, и максимально сократить затраты на его эксплуатацию и ремонт, но и (что немаловажно) оптимизировать инвестиции в развитие этих активов.

Интерес сетевых компаний к системам управления техническими активами объясняется следующим. Во-первых, большая часть основного электротехнического оборудования на многих ПС отработала установленный парковый ресурс или определенный нормативными документами срок эксплуатации и работает на пределе своих возможностей. Во-вторых, система планово-предупредительных ремонтов (ППР) электрооборудования сегодня, когда ПС являются собственностью предприятий электросетевого комплекса, а не находятся на балансе государства, требует серьезных финансовых затрат и большой трудоемкости (иногда настолько большой, что для проведения работ недостаточно одного планового периода). Это характеризует систему ППР как недостаточно эффективную для предприятий электросетевого комплекса ни с технической, ни с экономической точки зрения. Поэтому большинство из них

стараятся перейти к системе обслуживания электрооборудования по фактическому состоянию. Такой переход возможен только при условии использования методик и оборудования на основе методов неразрушающего контроля — методов технической диагностики (без разбора оборудования): электрических, тепловых, оптических, акустических и др.

#### Диагностика электрооборудования на подстанциях

В настоящее время диагностика электрооборудования с помощью методов неразрушающего контроля очень важна и востребована на рынке услуг. Некоторые ее виды являются обязательными и регламентируются нормативными документами РФ для всех видов электрооборудования. Поэтому статистика данных технической диагностики присутствует в различных видах почти на любом энергетическом объекте, что дает возможность использовать эти данные для оценки состояния электрооборудования или интегральной оценки ПС, а также делать прогнозы об остаточном ресурсе электрооборудования.

В качестве подтверждения указанного был проанализирован крупный энергоузел электроэнергетической системы Свердловской области, состоящий в период с 2007 по 2012 г. из 106 ПС напряжением 35 – 220 кВ. Все ПС расположены в черте крупных городов, снабжающих в том числе промышленных потребителей. Суммарная установленная мощность

Таблица 1

Оборудование	Методы диагностики электрооборудования				
	Тепловой	Хроматографический	Акустический	Электрический	Измерение тангенса угла диэлектрических потерь
Силовой трансформатор	+	+	+	+	+
Трансформатор тока	+	+			
Трансформатор напряжения	+				
Силовой выключатель	+				
Вентильный разрядник и нелинейный ограничитель перенапряжений	+				
Разъединитель	+				
Высоковольтные вводы силовых трансформаторов и опорные изоляторы	+	+	+	+	
Кабельная линия	+			+	
Воздушная линия	+				
Высокочастотный заградитель	+				

силовых трансформаторов — 1450 МВ·А. В табл. 1 представлены основные методы диагностики электрооборудования на ПС 35 — 110 кВ, применявшиеся (отмечены знаком +) соответственно для каждого вида электрооборудования за рассматриваемый период. Как видно, для анализа технического состояния некоторых видов электрооборудования использовались сразу несколько видов диагностирования, что позволяет в некоторых случаях иметь дополнительную информацию.

Применение системы обслуживания оборудования по фактическому состоянию недостаточно для повышения эффективности системы управления техническими активами. В первую очередь необходима автоматизированная система, которая не только могла бы анализировать данные о состоянии оборудования для его оценки, но и в дальнейшем была способна оценить риски, а именно — последствия отказов электрооборудования.

Большинство предприятий электросетевого комплекса занимаются разработкой автоматизированных систем управления техническими активами. Реализация такой системы представляет собой очень сложную задачу, особенно с точки зрения разработки математической модели. Одна из подзадач такой системы, как

уже отмечалось — оценка технического состояния (ОТС) электрооборудования.

#### Методы математического моделирования

Математическое моделирование таких объектов, как ПС, — трудно реализуемая задача, поскольку электрические системы относятся к классу сложных систем, в которых закон распределения воздействующих на систему параметров неизвестен и функционирование системы происходит в условиях неопределенности, а следовательно, переменные системы могут иметь количественно-качественное описание.

Для моделирования системы ОТС электрооборудования на ПС применяют различные математические аппараты, но исходная информация независимо от метода построения модели формируется всегда. В энергетике большинство исходных выборок для систем ОТС электрооборудования формируется из выборки экспериментальных данных (параметров оборудования) и экспертных оценок (ЭО) состояния электрооборудования (принимаются на основе анализа мнений квалифицированных специалистов).

Существует множество методов построения систем ЭО. Некоторые из них стали самостоятельными нормативными документами.

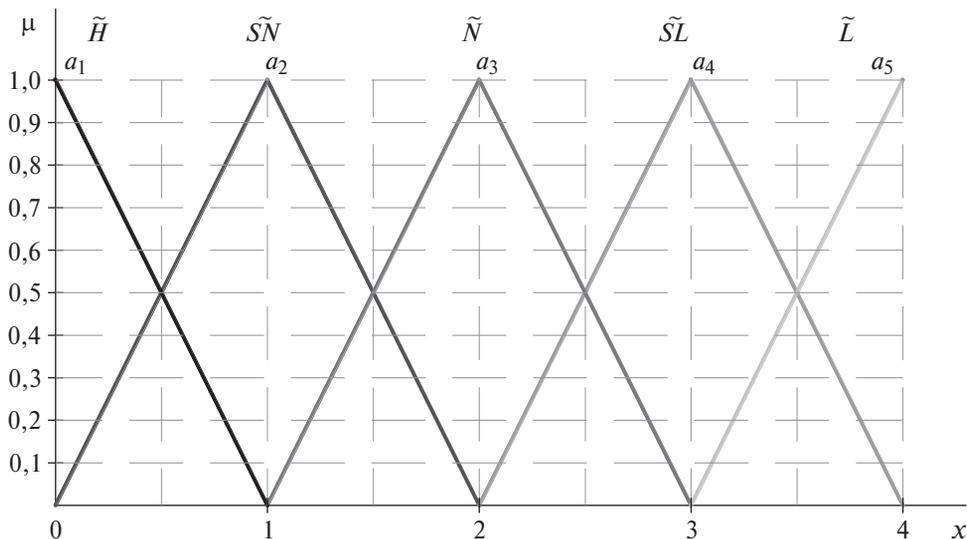


Рис. 1. Функции принадлежности к категориям состояния в зависимости от нечеткой оценочной характеристики экспертов

Но большинство основаны на так называемых лингвистических переменных, значения которых по своей сути являются нечеткими множествами [1]. Это значит, что описание таких переменных носит субъективный характер и зависит от того контекста, где они используются.

Во многих автоматизированных системах управления техническими активами для ОТС с помощью ЭО вводятся термины, характеризующие состояние оборудования: непригодное, неудовлетворительное, удовлетворительное, хорошее и т. д. Градация состояний, количество и представление могут быть различными в зависимости от системы и назначения. Система ЭО формируется на местах, т. е. персоналом на самих объектах (например, на ПС и т. д.) и уже после этого вносится в общую систему. Это связано в первую очередь с большим количеством данных, поступающих в систему от каждого объекта с довольно высокой скоростью их обновления. В зависимости от масштаба энергообъекта, его удаленности, класса напряжения, схемы ПС и т. д. квалификация персонала, обслуживающего энергообъект, различна, а значит, ЭО не всегда достаточно достоверна, так как полностью зависит от человеческого фактора.

Поскольку все предприятия пытаются перейти от системы ППР к системе обслуживания по фактическому техническому состоянию, значимость ОТС оборудования и ответственность за принятые решения резко повышаются. Поэтому система ЭО должна быть построена с максимально возможной достоверностью и точностью. Авторы данной статьи предложили [2] использовать для фор-

мирования ОТС метод искусственных нейронных сетей (ИНС). В этом случае начальная выборка формируется 1 раз, а далее система обучается самостоятельно. Это значит, что ЭО будет применена 1 раз, что позволит повысить точность полученного результата.

Для системы ЭО целесообразно в таких ситуациях применять методы нечеткой логики, а именно — нечеткие множества. Любой нечеткий объект характеризуется функцией принадлежности, которая в данном случае строится по ЭО [3]. При формировании этой функции важными аспектами являются тип шкалы, с помощью которой она описывается, и характер измерений. Среди методов построения данной функции применимы только косвенные методы, так как ЭО представляют собой исходную информацию и должны далее дополнительно обрабатываться для минимизации ошибки и определения значения степени принадлежности к какой-либо категории состояния.

Категория состояния представляет собой нечеткое определение, выраженное нечетким множеством. Для оценки приняты следующие категории состояния: отличное  $\tilde{H}$ , хорошее  $\tilde{SN}$ , нормальное  $\tilde{N}$ , плохое  $\tilde{SL}$ , очень плохое  $\tilde{L}$ , которые являются лингвистическими терминами. Каждое из возможных состояний  $i$  определяется соответствующей функцией принадлежности  $(L - R)$  типа  $\mu_i(x) \in R \rightarrow [0; 1]$  (рис. 1), где  $R$  — множество действительных чисел,  $x$  — нечеткая оценка, выставляемая экспертом объекту исследования.

Функция принадлежности к категории состояния  $i$  записывается в форме композиции  $L$ - и  $R$ -функций в следующем виде:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right), & \text{если } a-\alpha < x < a; \\ 1, & x = a; \\ R\left(\frac{x-a}{\beta}\right), & \text{если } a < x < a + \beta; \\ \text{иначе, } 0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha > 0$  и  $\beta > 0$  — левый и правый коэффициенты нечеткости соответственно, характеризующие границы категорий состояния, представленные в виде пороговых уровней;  $a$  — модальное значение характеристической функции принадлежности.

Мнения  $L$  экспертов относительно каждого признака работоспособности (показателя оценки)  $j$  объекта исследования  $k$ , формирующие множество нечетких оценок работоспособности элемента электрической сети  $X_{kj}$ , формализуются путем преобразования к нормализованным значениям с использованием характеристических функций  $i$ . В табл. 2 приведена матрица обработки ЭО. Значения характеристических функций ЭО приводятся к их модальным значениям  $a_i$ , для которых  $\mu_i(x_{kj}) = 1$ .

Обобщенная система ОТС электрооборудования рассчитывается на основе средневзвешенной балльной оценки. Для учета интенсивности проявления тех или иных свойств объектов электрической сети предложено использовать шкалу Саати  $\{0; 1; 3; 5; 7\}$ , согласно которой балл 0 свидетельствует об отсутствии какой-либо значимости характери-

Таблица 2

Показатель оценки	Эксперт				
	1-й	2-й	3-й	4-й	1-й
1	$\mu_i(x_{k11})$	$\mu_i(x_{k12})$	$\mu_i(x_{k13})$	$\mu_i(x_{k14})$	$\mu_i(x_{k1l})$
2	$\mu_i(x_{k21})$	$\mu_i(x_{k22})$	$\mu_i(x_{k23})$	$\mu_i(x_{k24})$	$\mu_i(x_{k2l})$
3	$\mu_i(x_{k31})$	$\mu_i(x_{k32})$	$\mu_i(x_{k33})$	$\mu_i(x_{k34})$	$\mu_i(x_{k3l})$
$j$	$\mu_i(x_{kj1})$	$\mu_i(x_{kj2})$	$\mu_i(x_{kj3})$	$\mu_i(x_{kj4})$	$\mu_i(x_{kj l})$

стики объекта исследования, 1 — об очень слабой значимости, 3 — о слабой значимости, 5 — о более или менее существенной значимости, 7 — о сильной значимости оценки.

Шкала балльных оценок ставится в соответствие категориям технического состояния. Хорошему состоянию ставится в соответствие наименьшая значимость с баллом, равным 0, очень плохому — максимальный балл 4. Такая шкала позволяет минимизировать дисперсию обобщенной ОТС, существенно повысив значимость негативных оценочных характеристик.

Средневзвешенную нормализованную оценку для каждого показателя применительно к объекту исследования вычисляют из следующего выражения

$$C_{kj} = \frac{\sum_{l=1}^L b_{lj} X_{kjl}^H}{\sum_{l=1}^L b_{lj}}, \quad (2)$$

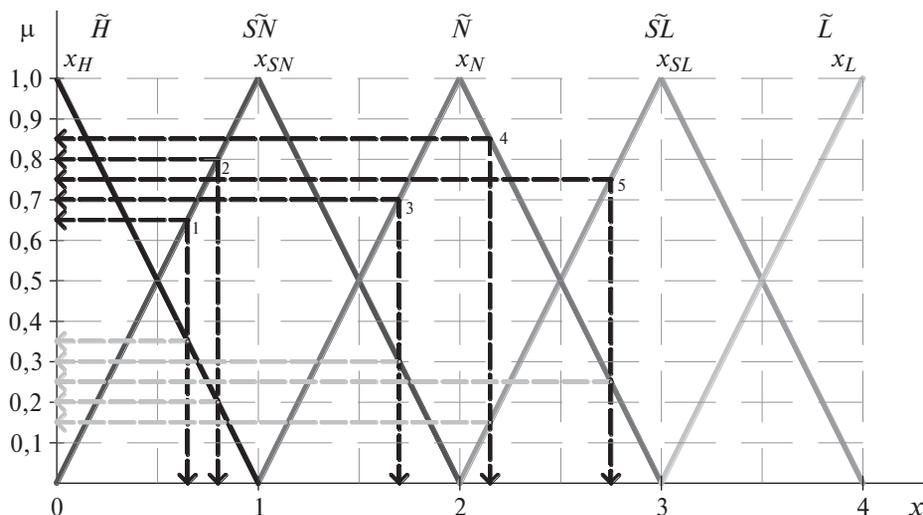


Рис. 2. Диаграмма определения принадлежности оценочной характеристики категории состояния

Таблица 3

Эксперт	Оценка $X$	$\mu_H$	$\mu_{SN}$	$\mu_N$	$\mu_{SL}$	$\mu_L$
1	0,65	0,35	0,65	0	0	0
2	0,80	0,2	0,8	0	0	0
3	1,70	0	0,3	0,7	0	0
4	2,15	0	0	0,85	0,15	0
5	2,75	0	0	0,25	0,75	0

где  $X_{kjl}^H$  — нормализованная ЭО  $l$  относительно показателя  $j$  объекта исследования  $k$ ;  $L$  — общее количество экспертов;  $b_{lj}$  — балл оценочной характеристики суждения эксперта  $l$  относительно показателя  $j$ .

Рассмотрим пример определения обобщенной ЭО произвольного показателя работоспособности. Предположим, что в опросе участвовало пять экспертов, каждый из которых дал свою оценку состояния (рис. 2). Результаты обработки мнений экспертов с помощью функций принадлежности, позволяющие установить категорию состояния, приведены в табл. 3.

Общая оценка по данному показателю:

$$C = \frac{\sum_{l=0}^L b_l X_l^H}{\sum_{l=0}^L b_l} = \frac{1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 3 + 3 \cdot 5}{1 + 1 + 3 + 3 + 5} = 2,23.$$

Полученное значение  $C = 2,23$  соответствует нормальному состоянию на 77 % и плохому на 23 %. Дефаззифицированное значение обобщенной ЭО равно 2 и соответствует нормальному состоянию.

Представленный подход позволяет дать обобщенной ЭО как вербальные характеристики с учетом степени выраженности положительного эффекта, так и точные формализованные представления.

### Список литературы

1. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976.
2. Вопросы реализации оценки технического состояния силового оборудования на электрических подстанциях / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, М. В. Осотова. — Вопросы современной науки и практики. 2013, № 1 (45).
3. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006.

[lkhalymasaa@mail.ru](mailto:lkhalymasaa@mail.ru)