



УДК: 004.02 УДК 621.31:658.58:004.89

© 2015 г. Д.К. Елтышев, канд. техн. наук

(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ*

Рассмотрены принципы построения моделей диагностики состояния электротехнического оборудования на основе анализа и формализации экспертного опыта эксплуатации электроэнергетических объектов. Предложена методика определения параметров диагностических моделей с использованием нечеткого кластерного анализа данных, полученных при мониторинге оборудования.

Ключевые слова: электротехническое оборудование, диагностика, мониторинг, нечеткий логический вывод, база знаний, нечеткий кластерный анализ.

Введение

Значительный физический и моральный износ электротехнического оборудования (ЭО) на объектах энергетики и сравнительно низкие темпы их технического перевооружения являются одними из ключевых факторов, характеризующих проблему реформирования энергетической отрасли страны [1 – 4]. Для того, чтобы в современных условиях обеспечить надежное электроснабжение потребителей, а также снизить затраты на восстановление ЭО и ущерб от его простоя, требуется своевременное проведение ремонтных мероприятий на базе оперативной и достоверной информации о техническом состоянии (ТС) оборудования. Реализация данного подхода в рамках стратегии обслуживания ЭО по фактическому ТС основана на использовании современных методов диагностики, которая является связующим элементом между уровнем принятия решений и уровнем мониторинга ключевых технических параметров ЭО [3, 5 – 8].

Учитывая территориальную распределенность, сложную структуру, многопараметричность ЭО и как следствие – проблематичность формализации диагностических моделей [4 – 6], при постановке диагноза и принятии ответственных решений по выводу оборудования в ремонт электротехническому персоналу зачастую приходится иметь дело с неполной, недостоверной и неоднозначной информацией [3, 9 – 12]. Поэтому задача повышения эффективности диагностики ЭО может быть рассмотрена в контексте разработки и совершенствования методов и алгоритмов ее интеллектуализации на основе обобщения экспертных знаний и

* Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 14-07-96000 p_урала_a.

опыта по эксплуатации ЭО и их использования при анализе результатов обследования электроэнергетических объектов.

Постановка задачи исследования

Одним из подходов к интеллектуализации процесса диагностики является применение теории нечетких множеств и нечеткой логики для синтеза нечетких баз знаний и алгоритмов нечеткого вывода [13], позволяющих построить диагностическую модель с учетом логики мышления электротехнического персонала и его субъективного, экспертного видения ситуации (в том числе аварийной). В этом случае процесс диагностики сводится к решению задачи классификации, формализуемой при помощи нечеткой продукционной модели (НПМ) вида [8, 13, 14]:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \rightarrow y, \quad (1)$$

где x_i – лингвистическая переменная (ЛП) с термами $A_i = \{a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^{p_i}\}$, соответствующая i -му ключевому (наиболее информативному) параметру, характеризующему ТС ЭО (контролируется в ходе мониторинга); y – лингвистическая переменная с термами $S = \{s_1, s_2, \dots, s_L\}$, отображающая фактическое ТС ЭО; L – рассматриваемое число состояний ЭО; « \rightarrow » – обозначение процедуры нечеткого логического вывода (НЛВ).

Таким образом, модель (1) предполагает, что изменение значений ключевых параметров x_i в ходе эксплуатации ЭО является предпосылкой для изменения его ТС (нормальное, с отклонениями, предаварийное и т.д.) и появления дефектов в его элементах. Учитывая многопараметричность ЭО и большое количество ответственных узлов и агрегатов, НПМ вида (1) целесообразно строить по иерархическому принципу [11].

Методика интеллектуализации процесса диагностики ЭО

На рис. 1 в обобщенном виде представлена методика интеллектуальной поддержки принятия решений при диагностике ТС ЭО с использованием (1) и алгоритма НЛВ [13, 14].

Выбор диагностических параметров (блок № 1) в рамках методики осуществляется по принципу комплексного охвата различных элементов ЭО, исходя из требований к оперативности и достоверности получаемой информации, затрат на проведение измерительных работ, возможности определения значений параметров без отключения и демонтажа ЭО, а также других факторов технического и экономического характера. Используются (блок № 2) иерархический принцип построения НПМ и лингвистическая интерпретация параметров ЭО и возможных уровней его работоспособности. Ввиду сложности аналитического описания процессов, протекающих в ЭО, формализация причинно-следственных связей между значениями его технических параметров и фактическим состоянием осуществляется при помощи продукционных правил (блок № 4). Правила аккумулируют экспертный опыт эксплуатации ЭО энергетических объектов и формируют нечеткую базу знаний (НБЗ) диагностирования.



Рис. 1. Алгоритм интеллектуализации диагностирования ТС ЭО:

I – анализ статистических данных и выбор структуры НПМ;

II – оценка фактического ТС на основе текущих данных мониторинга.

В компактной форме НБЗ может быть представлена конструкцией, построенной при помощи операций \cap (И) и \cup (ИЛИ), связывающих значения входных переменных x_i и выходной переменной y [13]:

$$\bigcup_{p=1}^{k_l} \left[\bigcap_{i=1}^m (x_i = a_i^{lp}) \text{ с весом } \omega_{lp}^{<S>} \right] \rightarrow y = s_l, \quad (2)$$

где a_i^{lp} , $i = 1:m$, $l = 1:L$, $p = 1:k_l$ – оценка параметра x_i в p -й части l -го правила, выбираемая из множества $A_i(1)$; $\omega_{lp}^{<S>} \in [0,1]$ – вес p -й части правила для значений s_l выходной переменной; k_l – количество правил, характеризующих оценку выходной переменной s_l ; s_l – оценка уровня ТС ЭО по l -му правилу в соответствии с множеством значений $S(1)$.

В случае использования иерархических НПМ структура НБЗ несколько усложняется, а выражение (2) расширяется с учетом количества уровней иерархии и необходимости последовательно выполнять логический вывод по каждой базе знаний в отдельности [11, 13].

Построение НБЗ требует задания структуры и параметров функций принадлежности (ФП) оценочных термов для каждой ЛП (блок № 3), позволяющих словесно охарактеризовать величину рассматриваемого диагностического признака (например, температура элемента конструкции ЭО: «Низкая», «Средняя», «Высокая»). В этом случае процесс диагностики заключается в интеллектуальной обработке информации (блок № 6), полученной в ходе мониторинга выбранных ключевых технических параметров ЭО (блок № 5), и формировании заключения о фактическом состоянии оборудования с выделением возможных дефектов в его элементах и выработкой рекомендаций по управлению техническим обслуживанием и ремонтом (блок № 7).

Для реализации НЛВ по базе знаний (2) используется система логических уравнений:

$$\mu_{s_l}(X) = \bigvee_{p=1}^{k_l} [\omega_{lp}^{<S>} \cdot \bigwedge_{i=1}^{m_l} \mu_{a_i^{lp}}(x_i)], \quad (3)$$

где \bigvee (\bigwedge) – операции максимизации (минимизации) нечетких множеств; X – множество входных переменных НПМ.

Итоговая оценка состояния ЭО определяется путем агрегирования результатов по всем нечетким термам [13] и соответствует заключению, имеющему максимальную степень принадлежности:

$$\mu_s(y) = \max_{l=1:L} (\mu_{s_l}(X)). \quad (4)$$

Определение параметров модели диагностики состояния ЭО

Поскольку выбор ФП переменных нечеткой модели связан с достоверностью заключений о состоянии ЭО, предлагается адаптировать их к особенностям эксплуатации оборудования с применением нечеткого кластерного анализа (НКА) [13, 15, 16], используя ретроспективные тренды контролируемых параметров (формуляры, акты обследований и т.д.).

Алгоритм синтеза ФП основан на методе нечетких c -средних [15, 16], который позволяет производить кластеризацию по значениям x_i параметров ЭО, полученным при мониторинге (обследовании) электроэнергетического объекта. Рассмотрим основные итерации НКА [15, 16] как процесса нахождения координат центров кластеров и отнесения к p -му кластеру k -го измерения i -го ключевого параметра ЭО (рис. 2).

На начальном этапе в соответствии с перечнем контролируемых параметров ЭО (блок № 1) и структурой модели диагностики (количество входных ЛП модели (1) и взаимосвязи между ними) определяется число термов, необходимых для интерпретации каждого из параметров.

В качестве исходных данных (блок № 2) для реализации НКА принимаются: 1) выборка значений параметров ЭО $X^{(k)} = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_m^k\}$, $k = 1:K$ (на основании анализа результатов мониторинга, диагностики и других мероприятий, связанных с оценкой состояния оборудования), соответствующих входным ЛП модели (1); 2) число заданных кластеров c (равное числу термов ЛП); 3) критерии останова алгоритма – граничное число итераций z и ошибка ε . Вес расчета целе-

вой функции и центров кластеров, позволяющий усилить влияние элементов с большими и уменьшить влияние элементов с малыми значениями степеней принадлежности, принимается равным двум [13].

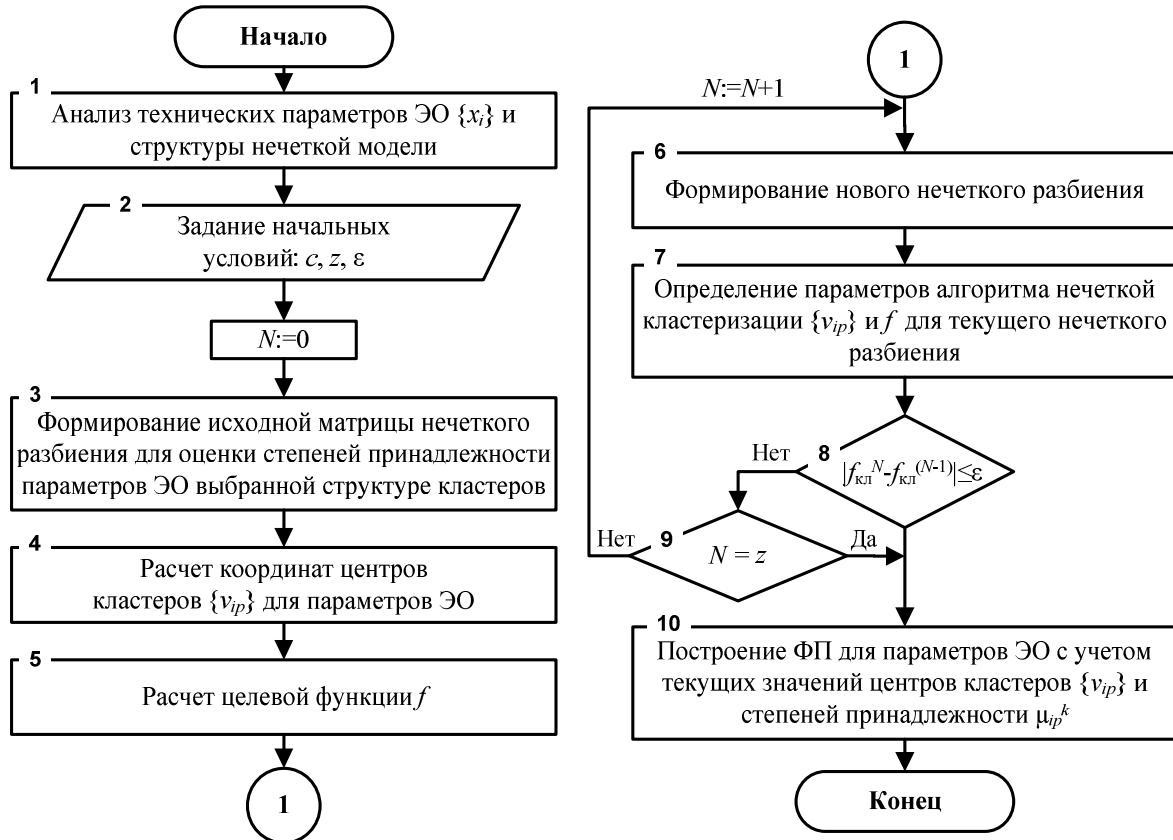


Рис. 2. Блок-схема процесса поиска параметров ФП переменных модели диагностики ЭО на основе НКА.

Исходные значения координат центров кластеров $v_p = \{v_{ip}\}$ вычисляются (блок № 4) на базе начальной матрицы нечеткого разбиения (блок № 3) $F_i = [\mu_{ip}^k]$ в соответствии с выражениями:

$$\sum_{p=1}^c \mu_{ip}^k = 1, k = 1: K, \quad 0 < \sum_{k=1}^K \mu_{ip}^k < K, \quad (5)$$

$$v_{ip} = \frac{\sum_{k=1}^K (\mu_{ip}^k)^2 x_i^k}{\sum_{k=1}^K (\mu_{ip}^k)^2}, i = 1: m, k = 1: K, p = 1: c, \quad (6)$$

где μ_{ip}^k определяет степень принадлежности p -му кластеру k -го измерения i -го параметра ЭО.

В качестве целевой функции (блок № 5), играющей роль критерия оценки эффективности поиска значений центров кластеров и степеней принадлежности, используется выражение вида:

$$f_{\text{кл}} = \sum_{p=1}^c \sum_{k=1}^K (\mu_{ip}^k)^2 \|x_i^k - v_{ip}\|^2. \quad (7)$$

Новое нечеткое разбиение (блок № 6), для которого в последующем определяются координаты центров кластеров (блок № 7) и значение целевой функции

по выражениям (6) и (7), определяется из условий:

$$\text{если } \|x_i^k - v_{ip}\|^2 > 0, \text{ то } \mu_{ip}^k = \left[\frac{\|x_i^k - v_{ip}\|^2}{\sum_{q=1}^c \|x_i^k - v_{iq}\|^2} \right]^{-1}, \quad (8)$$

$$\text{если } \|x_i^k - v_{ip}\|^2 = 0, \text{ то } \mu_{ik}^g = \begin{cases} 1, & q \neq p, \\ 0, & q = p, \end{cases} \quad q=1:c. \quad (9)$$

Алгоритм завершается при достижении условий $|f_{\text{кл}}^N - f_{\text{кл}}^{(N-1)}| \leq \varepsilon$ и $N = z$ (блоки № 8, № 9), где $f_{\text{кл}}^N$ и $f_{\text{кл}}^{(N-1)}$ соответствуют значениям целевой функции, полученным на текущей и предыдущей итерациях.

Результатом работы алгоритма являются итоговые значения центров кластеров $v_p = \{v_{ip}\}$, $p = 1:c$ и матрица нечеткого разбиения $F_i = [\mu_{ip}^k]$, найденные для каждой ЛП (ключевого параметра ЭО) модели (1).

Искомые ФП термов (блок № 10) входных ЛП нечеткой модели (1) могут быть сформированы одним из следующих способов.

Способ 1. Путем точечного построения по значениям v_{ip} и μ_{ip}^k , полученным на завершающем этапе работы, алгоритма НКА.

Способ 2. Путем построения ФП гауссового типа [13] для каждого нечеткого термина $a_i^p(x_i)$, координаты центров максимумов α и коэффициенты концентрации β которых определяются по формулам [16]:

$$\alpha_{ip} = v_{ip}, \quad (10)$$

$$\beta_{ip} = \left[\frac{\sum_{k=1}^K (\mu_{ip}^k)^2 (x_i^k - v_{ip})^2}{\sum_{k=1}^K (\mu_{ip}^k)^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

Способ 3. Путем построения гауссовых ФП в соответствии с (10) и (11) и дополнительного приведения к единице степеней принадлежности точек, расположенных левее крайнего левого и правее крайнего правого центров максимумов, на всем интервале изменения исследуемого параметра ЭО. Это позволит сохранить прозрачность модели [13] при интерпретации результатов ее работы и ее обучении.

Исследование методики интеллектуализации диагностики ЭО

Для оценки эффективности предложенных решений рассмотрим упрощенный пример построения модели оценки состояния баковых масляных выключателей по двум ключевым параметрам, измеряемым в процессе тепловизионного контроля узлов их контактной системы.

Структура НПМ типа Сугено для диагностики состояния выключателя при-

ведена на рис. 4. В качестве входных параметров модели выбраны ЛП «Избыточная температура внешних контактных соединений» (x_1) и ЛП «Избыточная температура контактов дугогасительного устройства» (x_2). Выходная переменная модели y принимает дискретные значения, соответствующие оценкам состояния оборудования «Хорошее» (Х), «Удовлетворительное» (У), «Неудовлетворительное» (Н).

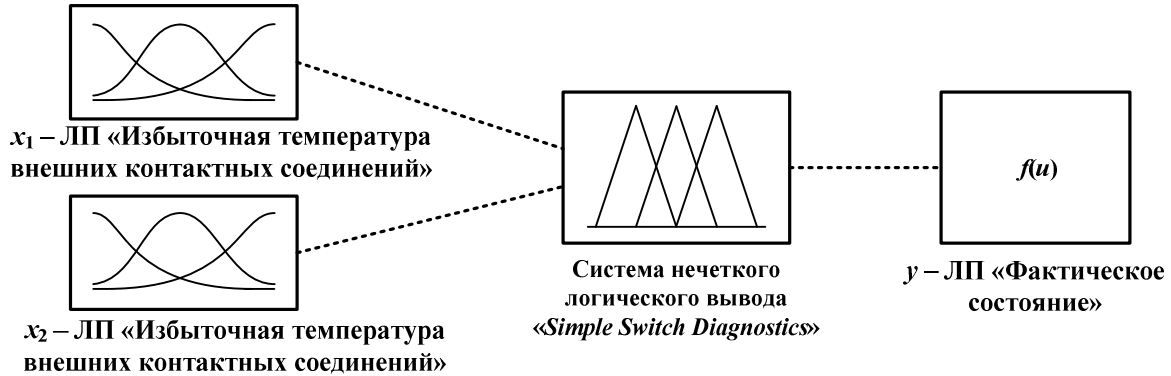


Рис. 3. Структура нечеткой модели диагностики состояния масляных баковых выключателей в пакете *MATLAB*.

Анализ технической документации в области эксплуатации ЭО позволяет судить о рациональности лингвистического описания его параметров при помощи трех – пяти оценочных термов [10]. Поэтому интервал изменения значений ЛП x_1 и x_2 разбит на три категории: «Низкий», «Средний» и «Высокий». Это соответствует разделению области измерения контролируемых параметров на три части: в пределах допустимых значений (область нормальной эксплуатации), незначительно выше допустимых значений (несущественное отклонение от нормы) и существенно выше допустимых значений (критическое состояние ЭО).

В табл. 1 приведена база знаний модели, включающая 9 логических конструкций: ЕСЛИ <Значения параметров ЭО>, ТО <Фактическое ТС>.

Таблица 1

Оценки контролируемого параметра		Избыточная температура внешних контактных соединений, x_1		
		Низкая	Средняя	Высокая
Избыточная температура контактов дугогасительного устройства, x_2	Низкая	Х	У	Н
	Средняя	У	У	Н
	Высокая	Н	Н	Н

В табл. 2 приведены результаты тестирования нечетких моделей для оценки состояния выключателей при различных вариантах построения ФП переменных до и после настройки весов правил базы знаний, где СКО – среднее квадратическое отклонение между модельными и экспериментальными значениями степеней принадлежности выходной переменной.

Анализ данных табл. 2 показывает, что для моделей, использующих алгоритм НКА при формировании ФП входных ЛП, ошибка классификации снижается как на обучающей, так и на тестирующей выборках.

На рис. 4 и 5 представлен пример реализации алгоритма НКА для построения ФП входных переменных модели по данным обработки протоколов теплови-

зионного контроля масляных выключателей типа С-35М за период 2010-2013 гг. для трех априори заданных классов. На рис. 6 приведены результаты тестовой диагностики состояния выключателей при различных значениях входных параметров для двух случаев построения ФП.

Таблица 2

Количественная оценка результатов тестирования моделей диагностики состояния выключателей			Вариант построения ФП для входных переменных модели		
			Способ 2 (рис. 5, б)	Способ 3 (рис. 5, в)	Способ 4 (рис. 5, г)
До Настройки весов правил	Ошибка распознавания состояния, %	обучающая выборка	27,08	27,08	22,92
		тестирующая выборка	30,00	30,00	27,27
	СКО	обучающая выборка	0,37	0,38	0,34
		тестирующая выборка	0,42	0,45	0,44
После Настройки весов правил	Ошибка распознавания состояния, %	обучающая выборка	14,58	12,50	14,58
		тестирующая выборка	12,73	11,82	17,27
	СКО	обучающая выборка	0,48	0,47	0,54
		тестирующая выборка	0,44	0,41	0,53

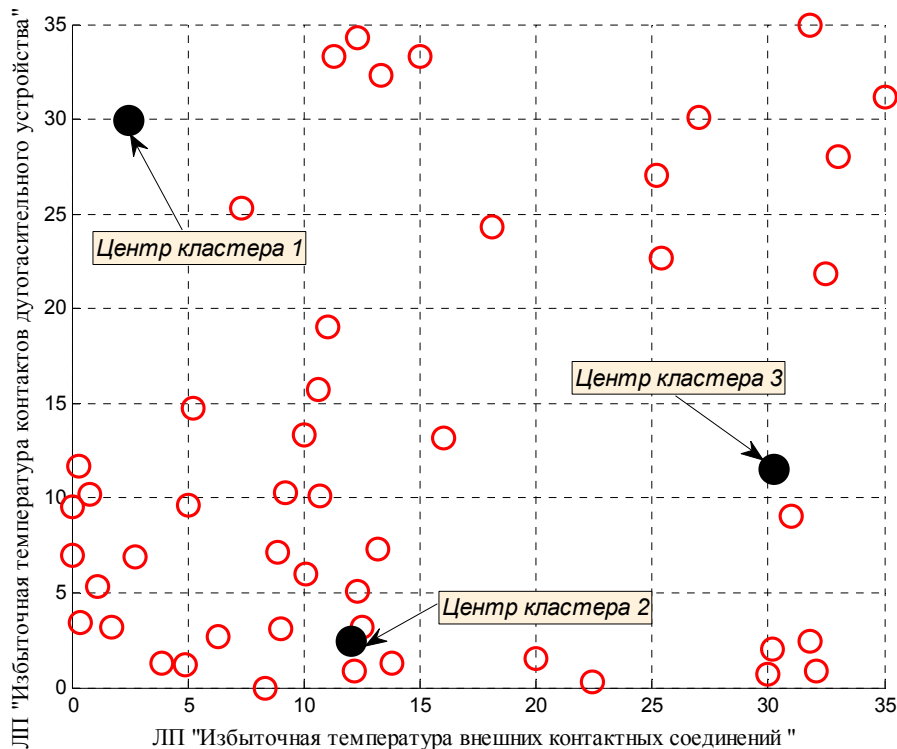
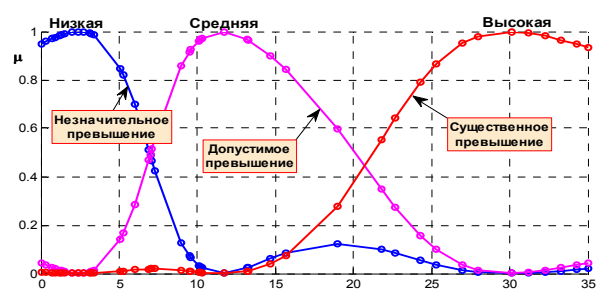
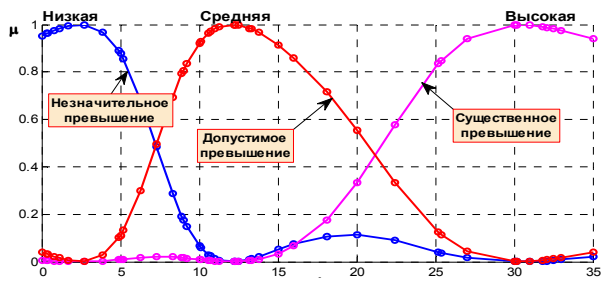
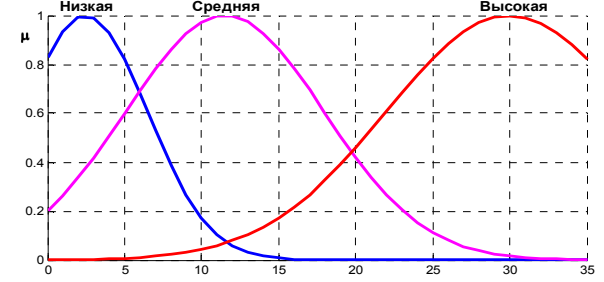
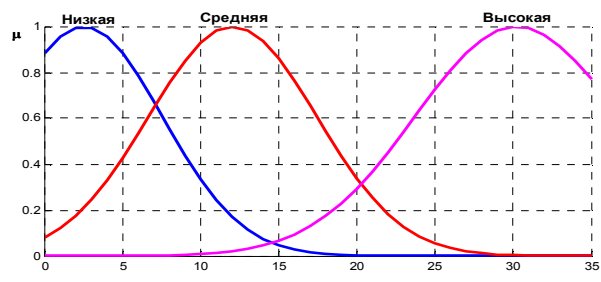


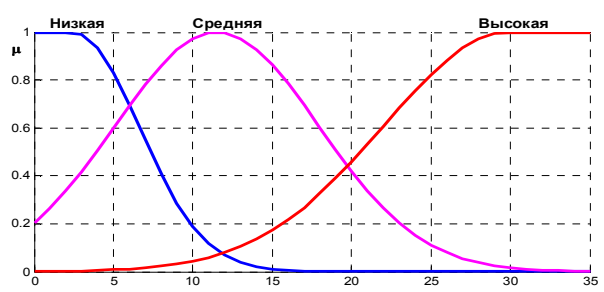
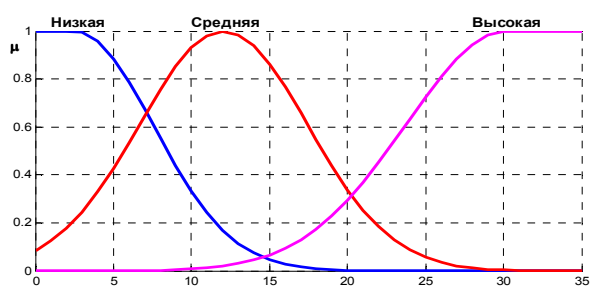
Рис. 4. Применение алгоритма НКА в задаче диагностики состояния масляных выключателей по результатам мониторинга температурных параметров его элементов.



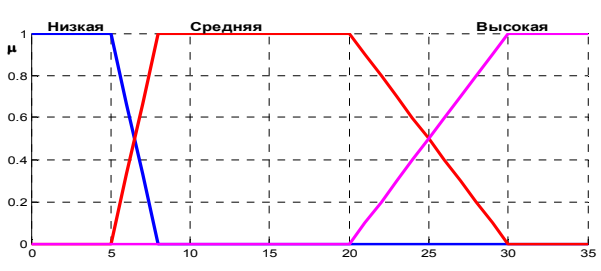
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Результаты построения ФП переменных x_1 и x_2 : а) по способу 1; б) по способу 2 в соответствии с (10), (11); в) по способу 3; г) экспертным способом.

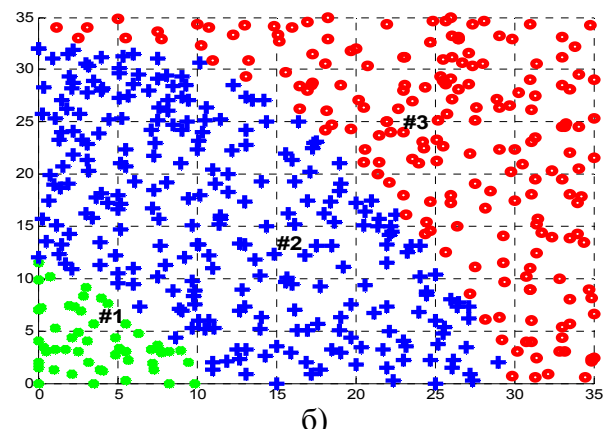
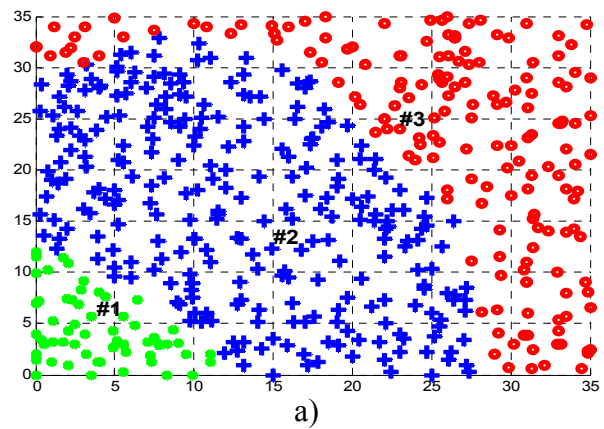


Рис. 6. Результаты оценки состояния масляных выключателей при помощи НПМ после настройки весов правил базы знаний: а) при построении ФП по способу 2; б) при построении ФП по способу 3.

Заключение

Предложенная в статье методика оценки состояния ЭО на базе моделей (1) обеспечивает интеллектуальную обработку диагностической информации, позволяет учитывать и накапливать опыт эксплуатации оборудования для принятия ответственных управленческих решений при различных объемах разнородной исходной информации об исследуемом объекте. Включение в методику процедуры НКА за счет повышения точности классификации дает возможность снизить число ошибочных диагнозов работоспособности ЭО, что в перспективе будет способствовать своевременному обнаружению критических состояний, количественному снижению отказов оборудования и совокупных затрат на его эксплуатацию [2].

Кроме того, применение НКА при наличии ретроспективных данных о функционировании ЭО позволяет формировать ФП параметров нечетких моделей автоматически, без привлечения экспертов, снижая тем самым трудоемкость процесса. В случае отсутствия статистического материала (данных по мониторингу, диагностике и т.д.) для построения ФП можно использовать методы экспертной обработки информации [8, 9, 13] либо произвольно определять вид ФП с последующей оптимизацией ее параметров (в процессе накопления статистических данных) [16, 17].

Совместное использование процедур НКА, НЛВ и настройки нечетких моделей с учетом нормативно-технической, статистической и экспертной информации о его функционировании позволит адаптировать диагностические модели к специфике ЭО и повышать достоверность оценок его технического состояния. При этом реализация методики диагностики ЭО и получаемые на ее основе заключения могут быть интегрированы в общую структуру системы интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении техническим обслуживанием и ремонтом оборудования по фактическому состоянию.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Петроченков А.Б.* Об управлении жизненным циклом электротехнических комплексов в нефтедобыче // *Электротехника*. – 2012. – № 11. – С.40-48.
2. *Петроченков А.Б., Ромодин А.В.* Разработка подходов к построению комплекса «Энергооптимизатор» // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. – 2013. – № 4. – С.20-25.
3. *Казанцев В.П., Петроченков А.Б., Ромодин А.В., Хорошев Н.И.* Некоторые аспекты технологии эксплуатации электротехнических объектов на основе методов краткосрочного прогнозирования технического состояния // *Электротехника*. – 2011. – № 11. – С.28-34.
4. *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.
5. *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.
6. *Петроченков А.Б.* О подходах к оценке технического состояния электротехнических комплексов и систем // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2012. – № 12. – С.16-20.

7. *Кычкин А.В.* Долгосрочный энергомониторинг на базе программной платформы OpenJEVis // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 1 (9). – С.5-15.
8. *Петроченков А.Б., Кычкин А.В., Темичев А.А.* Интегрированная диагностическая поддержка распределенной системы мониторинга энергоданных // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – № 9. – С.10-16.
9. *Бочкарев С.В., Елтышев Д.К.* Методика принятия оптимальных решений при ремонте высоковольтного электротехнического оборудования // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 6. – С.142-146.
10. *Хорошев Н.И., Казанцев В.П.* Применение правил нечеткой логики при эксплуатации электротехнического оборудования // Электротехника. – 2011. – № 11. – С.59-64.
11. *Костерев Н.В., Бардик Е.И., Вожаков Р.В., Курач Т.Ю.* Нечеткие алгоритмы оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования // Научные труды Донецкого национального технического университета. Электротехника и энергетика. – 2008. – № 8. – С.65-70.
12. *Петроченков А.Б., Ромодин А.В., Хорошев Н.И.* Об одном формализованном методе оценки управленческих решений (на примере управления электротехническими объектами) // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – № 87. – С.166-171.
13. *Штовба С.Д.* Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>.
14. *Кычкин А.В.* Интеллектуальная информационно-диагностическая система для исследований кровеносных сосудов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2013. – № 3. – С.114.
15. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде *MATLAB* и *fuzzyTECH*. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
16. *Ходашинский И.А.* Идентификация нечетких систем: методы и алгоритмы // Проблемы управления. – 2009. – №4. – С.15-23.
17. *Елтышев Д.К., Петроченков А.Б., Бочкарев С.В.* К вопросу о применении генетических методов для решения задач поддержки жизненного цикла электрооборудования // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – Т.2. – С. 136-142.

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

E-mail:

Елтышев Денис Константинович – eltyshev@msa.pstu.ru, eltyshevdk@gmail.com.