

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Д. К. Елтышев^а, канд. техн. наук, доцент

^аПермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, РФ

Постановка проблемы: оперативное обнаружение и устранение дефектов высоковольтных выключателей и другого электротехнического оборудования, особенно при его значительном износе, является важной задачей обеспечения надежности систем электроснабжения. Многофакторность процессов эксплуатации выключателей накладывает существенные ограничения на выбор способов контроля их состояния, когда имеющаяся информация зачастую является неполной и неоднозначной. Один из вариантов решения проблемы — использование интеллектуальных информационных технологий. **Методы:** построение иерархически структурированной базы знаний на основе нечетких имплицитивных правил, имитирующих мышление электротехнического персонала, оценивающего состояние выключателя и его элементов. **Результаты:** разработан метод оценки состояния высоковольтных выключателей по результатам мониторинга с использованием формализованных экспертных знаний для интеллектуального анализа полученных данных. Метод основан на выборе и структурной декомпозиции параметров оборудования, измеряемых без его отключения от питающей сети и определяющих состав переменных нечеткой иерархической модели. Сущность метода заключается в пошаговом определении уровня критичности состояния выключателя, его элементов и формировании обоснованных управляющих воздействий по поддержанию работоспособности. Особенностью подхода является использование алгоритмов оптимизации, кластеризации и экспертных оценок для структурно-параметрической идентификации нечетких моделей, что позволяет адаптировать их к условиям эксплуатации выключателей и точно оценить состояние при недостатке статистических данных и их накоплении. На основе информации с реальных электросетевых объектов сформирована нечеткая модель и разработано программное обеспечение для оценки состояния масляных выключателей средней мощности. Качество модели определялось сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными и заключениями специализированных организаций. При этом установлено, что модель обеспечивает повышение количества верно распознанных состояний не менее чем на 5 % в сравнении с традиционными методами обработки данных. **Практическая значимость:** использование предложенных нечетких моделей в экспертно-диагностических системах электросетевых объектов позволит на 10–20 % снизить время простоя выключателей благодаря повышению достоверности оценок состояния и принятию обоснованных, оперативных решений.

Ключевые слова — техническое состояние, нечеткая иерархическая модель, база знаний, высоковольтный выключатель, комплексная оценка, принятие решений.

Введение

Построение интеллектуальных электрических сетей является одной из ключевых тенденций в области реформирования электроэнергетической отрасли страны [1, 2]. Подобные сети требуют создания не только энергетической, но и информационной инфраструктуры объектов генерации, распределения и потребления электроэнергии с использованием современных информационно-управляющих технологий. Ситуация такова, что большинство оборудования электросетевых объектов практически выработало свой ресурс и не может обеспечить стабильное электроснабжение потребителей ввиду своей повышенной аварийности. По статистике [3–6], существенное число нештатных ситуаций в энергосистемах связано с работой маслонаполненного оборудования, в частности масляных высоковольтных выключателей (малообъемных и баковых), доля которых в парке электротехнического оборудования по-прежнему высока.

Поскольку высоковольтные выключатели выполняют задачу обеспечения надежной и безопас-

ной работы как в нормальных, так и в аварийных режимах [3], они являются исключительно важными элементами и традиционных, и потенциально новых электрических сетей, построенных на базе концепции *Smart Grid* [2]. В условиях ограниченного финансирования темпы технического перевооружения электросетевых объектов достаточно невысоки, поэтому проблема снижения затрат на восстановление высоковольтного оборудования и ущерба от его отказов является весьма актуальной. Существенную роль в данном процессе играют методы и технологии оценки состояния выключателей, а также их отдельных элементов, используемые для своевременного обнаружения и оперативного устранения потенциально опасных дефектов.

Постановка задачи исследования

Территориальная распределенность электросетевых объектов, отсутствие единой методологии их обслуживания, устанавливающей однозначные критерии нормирования значений параметров высоковольтных выключателей и прочего

электротехнического оборудования, накладывая определенные ограничения на выбор методов, используемых для оценки их состояния [3, 7–9]. Достаточная сложность построения диагностических функций на множестве параметров оборудования обуславливает потребность в применении подходов, ориентированных на работу как с количественными, так и с качественными данными, в том числе в условиях их неполноты, неоднозначности и недостоверности [10–12]. Решение данной проблемы связано с использованием интеллектуальных технологий и систем [12, 13], основанных не только на статистических данных, но и на экспертных знаниях, позволяющих достаточно просто и эффективно формализовать задачу диагностики возможных неисправностей оборудования. Реализовать данный подход с высокой степенью достоверности результата позволяет аппарат нечеткой логики [12, 14, 15].

Учитывая многопараметричность выключателей, целесообразно выделять группы параметров, свойственных его отдельным элементам или методам проведения измерений. В этом случае модели комплексной оценки состояния могут быть построены по иерархическому принципу [15, 16], что позволяет анализировать результаты как на отдельных уровнях иерархии (по узлам и агрегатам оборудования), так и по объекту в целом.

Процесс моделирования состояния выключателя в этом случае предполагает решение следующих задач: 1) построения иерархии нечеткого логического вывода на основе формализации ключевых диагностических параметров; 2) определения вида функций принадлежности, структуры базы знаний и алгоритма интеллектуальной обработки информации; 3) определения критериев принятия решений по результатам комплексной оценки.

В качестве исходных данных для проведения комплексной оценки состояния высоковольтных выключателей используются значения вектора параметров оборудования $X = (x_1, \dots, x_n)$, которые являются наиболее информативными и достаточно полно характеризуют работу его отдельных элементов. Иерархия оценки строится по принципу структурной декомпозиции параметров и формирования зависимости вида

$$Y = f(y_1 = f_1(x_1, \dots, x_{n_1}), \dots, y_i = f_i(x_{n_i}, \dots, x_{n_i}), \dots, y_m = f_m(x_{n_{i+1}}, \dots, x_n)), \quad (1)$$

где Y — обобщенный параметр технического состояния выключателя (результат комплексной оценки); y_i — промежуточные параметры оценки состояния.

Для выбора параметров выключателя принимаются критерии: простота и оперативность съема; возможность проведения мониторинга без

отключения и разбора выключателя, а также относительно невысокие затраты; проверка различных узлов либо характеристик отдельного узла с возможностью определения и устранения дефектов на ранних этапах их развития [3, 6, 12].

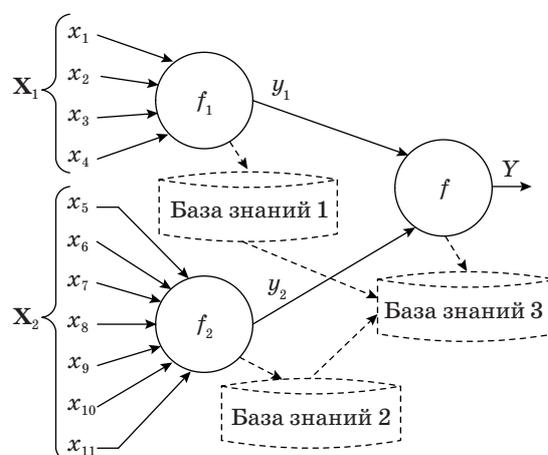
В составе нечетких иерархических моделей (НИМ), соответствующих структуре (1), переменные X и Y являются лингвистическими. При этом функции f и f_i представляют собой процедуры нечеткого логического вывода по соответствующей базе знаний, состоящей из набора нечетких импликаций «ЕСЛИ $\langle X \rangle$, ТО $\langle Y \rangle$ ». Интеллектуальная обработка данных в задаче (1) осуществляется на базе алгоритма Сугено [16].

Формирование системы иерархического нечеткого логического вывода

Формализация параметров, входящих в X , выполнена на примере высоковольтных масляных выключателей (МВ) (табл. 1) [17, 18] как одних из наиболее распространенных на большинстве действующих электросетевых объектов и нуждающихся в эффективной стратегии технического обслуживания и ремонта. Отметим, что существуют и другие важные параметры, оценку которых следует проводить при полном или частичном отключении выключателя от питающей сети в целях более детального анализа его состояния.

С учетом данных табл. 1 выбрана структура иерархического нечеткого логического вывода (рис. 1) для оценки состояния МВ, которая позволяет анализировать качество их работы по результатам тепловизионного контроля $y_1 = f(x_1, \dots, x_4)$, визуального обследования $y_2 = f(x_5, \dots, x_{11})$ и комплексно $Y = f(y_1, y_2)$.

Смысловая нагрузка лингвистических переменных x_i соответствует содержанию табл. 1.



■ Рис. 1. Дерево логического вывода к задаче комплексной оценки технического состояния МВ

■ **Таблица 1.** Параметры оценки состояния масляных выключателей

Обозначение и название параметра	Нормируемые значения	Метод/средство измерения
x_1 — избыточная температура болтовых контактных соединений узла	Менее 5 °С	Тепловизор, пирометр
x_2 — избыточная температура поверхности бака в зоне размещения дугогасительной камеры	Отсутствие локальных нагревов в точках контроля	То же
x_3 — избыточная температура поверхности бака в зоне размещения встроенных трансформаторов тока	Равномерное распределение температуры по поверхности бака	—
x_4 — разность температур по поверхности ввода	Равномерное распределение температуры по поверхности ввода	—
x_5 — внешнее состояние поверхности баков, привода и других элементов и систем	Отсутствие видимых дефектов, трещин, коррозии, оплавлений	Визуально
x_6 — внешнее состояние фарфоровых покрышек (изоляторов)	Отсутствие трещин, сколов, загрязнения фарфора, подтеков заливочной мастики	То же
x_7 — уровень шума внутри бака	Отсутствие шума и треска	Аудиально
x_8 — уровень масла в баке	В пределах шкалы маслоуказателя	Визуально
x_9 — наличие течи масла в баке	Отсутствует	То же
x_{10} — следы выброса масла из газоотводов	Отсутствуют	—
x_{11} — качество работы системы обогрева бака и привода	Своевременное включение (отключение) при температуре окружающей среды ниже минус 20 °С	Визуально; по результатам температурного контроля поверхности бака

■ **Таблица 2.** Структура нечетких импликаций на примере базы знаний 1

№ правила	Предпосылки (оценки контролируемых параметров)				Заключение
1	ЕСЛИ $x_1 = \langle \text{Н} \rangle$	И $x_2 = \langle \text{Н} \rangle$	И $x_3 = \langle \text{Н} \rangle$	И $x_4 = \langle \text{Н} \rangle$	ТО $Y = \langle \text{В норме} \rangle$
...	...				
14	ЕСЛИ $x_1 = \langle \text{НС} \rangle$	И $x_2 = \langle \text{Н} \rangle$	И $x_3 = \langle \text{НС} \rangle$	И $x_4 = \langle \text{Н} \rangle$	ТО $Y = \langle \text{Удовлетворительное} \rangle$
...	...				
63	ЕСЛИ $x_1 = \langle \text{ВС} \rangle$	И $x_2 = \langle \text{НС} \rangle$	И $x_3 = \langle \text{Н} \rangle$	И $x_4 = \langle \text{ВС} \rangle$	ТО $Y = \langle \text{Ниже нормы} \rangle$
...	...				
79	ЕСЛИ $x_1 = \langle \text{В} \rangle$	ИЛИ $x_2 = \langle \text{В} \rangle$	ИЛИ $x_3 = \langle \text{В} \rangle$	ИЛИ $x_4 = \langle \text{В} \rangle$	ТО $Y = \langle \text{Критическое} \rangle$

Примечание: Н — низкая, НС — ниже средней, ВС — выше средней, В — высокая.

Общее количество правил иерархической базы знаний, сформированных на основе экспертных мнений, равно 104 (табл. 2).

Вид и параметры функций принадлежности входных лингвистических переменных $X_1 = (x_1, \dots, x_4)$ формируются на основе нечеткой кластеризации [12] с использованием данных тепловизионного контроля выключателей. Для построения функций принадлежности переменных $X_2 = (x_5, \dots, x_{11})$ используется метод экспертных оценок (рис. 2) [16].

Термы выходной переменной Y и промежуточных переменных y_1 и y_2 , характеризующие уровни критичности состояния МВ, соответствуют вербальным оценкам «В норме», «Удовлетворительное», «Ниже нормы», «Критическое» и выбраны по итогам анализа эксплуатационной и нормативно-технической документации, а также с учетом опыта электротехнического персонала, ответственного за обслуживание оборудования.

Функции принадлежности промежуточных переменных y_1 и y_2 не задаются, а для выход-

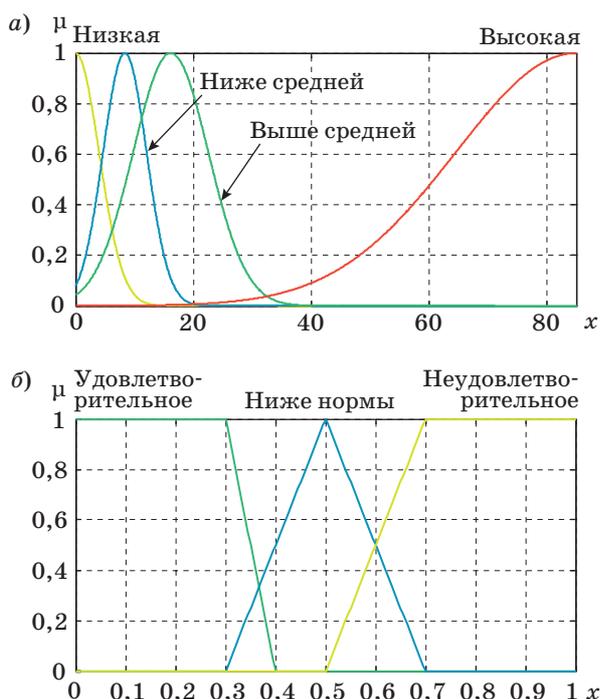


Рис. 2. Пример задания функций принадлежности для представления параметров X в виде лингвистических переменных: при помощи нечеткой кластеризации для x_1 (а); при помощи экспертных оценок для x_5 (б)

ной переменной Y могут быть заданы произвольно [16].

Расчет степеней принадлежности для оценки состояния выключателя по иерархической базе знаний осуществляется в два этапа [19]:

$$\mu_{d_u}(\mathbf{X}_i) = \bigvee_{t=1}^{e_u} \left[\omega_{ut}^{<D>} \cdot \bigwedge_{j=1}^{n_i} \mu_{a_j^{ut}}(x_j) \right]; \quad (2)$$

$$\mu_{s_l}(\mathbf{X}) = \bigvee_{t=1}^{h_l} \left[\omega_{lt}^{<S>} \cdot \bigwedge_{i=1}^m \mu_{d_{i,u}^{lt}}(\mathbf{X}_i) \right], \quad (3)$$

где $\mu_{a_j^{ut}}(x_j)$ — степень принадлежности значения переменной x_j к нечеткому терму a_j^{ut} в t -м правиле для u -го терма d_u промежуточной переменной; $\mu_{d_u}(\mathbf{X}_i)$ — степень принадлежности значений переменных, входящих в i -ю базу знаний, к оценке d_u промежуточной переменной; $\mu_{s_l}(\mathbf{X})$ — степень принадлежности значений вектора всех входных переменных к уровню (классу) состояния выключателя s_l ; $\mu_{d_{i,u}^{lt}}(\mathbf{X}_i)$ — степень принадлежности переменных \mathbf{X}_i к нечеткой оценке s_l выходной переменной Y в t -м правиле; $\omega_{ut}^{<D>}, \omega_{lt}^{<S>} \in [0, 1]$ — веса t -го правила для значений d_u промежуточной переменной и s_l выходной переменной; e_u и h_l — количество правил, характеризующих оценки d_u и s_l ; $\bigvee(\bigwedge)$ — операции нахождения максимума (минимума) нечетких множеств.

Решение, определяющее фактический уровень состояния выключателя по результатам вычислений (2) и (3), соответствует классу с максимальной степенью принадлежности [19]:

$$Y = \arg \max_{\{s_1, s_2, \dots, s_L\}} (\mu_{s_1}(\mathbf{X}), \mu_{s_2}(\mathbf{X}), \dots, \mu_{s_L}(\mathbf{X})). \quad (4)$$

Таким образом, выражения (2)–(4) позволяют осуществить переход от значений технических параметров отдельных элементов выключателя, контролируемых в процессе мониторинга электросетевого объекта, к заключению о его фактическом состоянии.

Формирование критериев принятия решений по результатам комплексной оценки

Общие рекомендации по использованию результатов оценки состояния выключателей при помощи НИМ для принятия решений о проведении мероприятий, направленных на поддержание их работоспособности в процессе эксплуатации, приведены в табл. 3.

Дополнительно сформированы рекомендации по контролю состояния отдельных конструктивных элементов и параметров МВ (табл. 4) [17, 18] с целью локализовать опасные дефекты и оценить объемы работ по их ликвидации.

Таблица 3. Рекомендации по дальнейшей эксплуатации выключателя

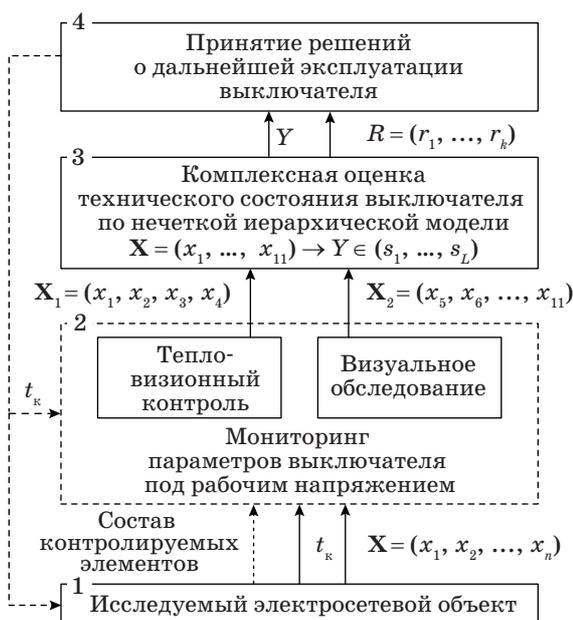
Состояние (класс) по НИМ	Заключение
«В норме»	Отсутствуют явные дефекты. Дальнейшая эксплуатация без ограничений с мониторингом состояния в штатном режиме (под рабочим напряжением)
«Удовлетворительное»	Малозначительный дефект. Эксплуатация в режиме мониторинга ключевых узлов с периодичностью, установленной на основе экспертных оценок инженерно-технического персонала
«Ниже нормы»	Развившийся дефект. Ограничение эксплуатации, мониторинг состояния с учащенной периодичностью. Расширенная диагностика в целях подтверждения факта наличия дефекта и его локализации. Устранение неисправности при ближайшем выводе из работы
«Критическое»	Критический дефект. Срочный ремонт с выводом из эксплуатации, локализацией и устранением дефекта в целях предупреждения аварийной ситуации

■ Таблица 4. Общие рекомендации по проведению мероприятий в случае неудовлетворительных результатов мониторинга элементов МВ

Параметр	Описание мероприятия
x_1	Зачистка, шлифовка и протяжка контактных соединений
x_2	Измерение переходного сопротивления токоведущей цепи каждого полюса выключателя. Установление учащенной периодичности мониторинга или ревизия дугогасительной камеры
x_3	Дополнительное обследование по программе [18] на предмет наличия витковых замыканий в обмотках встроенного трансформатора тока
x_4	Измерение тангенса угла диэлектрических потерь
x_5	Обеспечение целостности деталей выключателя, восстановление внешнего состояния (включая лакокрасочное покрытие). Проверка правильности положения указателя включенного или отключенного состояния выключателя
x_6	Чистка или замена
x_7	Отбор и анализ проб масла. Проверка на наличие утечек масла
x_8, x_9	Наружный осмотр для выявления мест утечек масла. Принятие мер, препятствующих отключению выключателем токов нагрузки и короткого замыкания (при значительном снижении уровня масла). Замена диафрагмы и маслоуказателя в случае их неисправности. Испытание бака, подтяжка или замена уплотняющих прокладок
x_{10}	Замена диафрагмы во избежание попадания влаги в масло. Проверка скоростных характеристик выключателя, состояния дугогасительной камеры и внутрибаковой изоляции
x_{11}	Восстановление работоспособности устройства подогрева бака (в условиях отрицательных температур окружающей среды)

Место нечеткой модели в структуре системы технического обслуживания и ремонта МВ по фактическому состоянию показано на рис. 3.

Согласно схеме, итоги комплексной оценки состояния выключателей по НИМ (блок № 3) и перечень полученных рекомендаций R являются основанием (блок № 4) для их замены либо проведения различных ремонтно-эксплуатационных мероприятий, включая расширенную диагностику с привлечением дополнительных методов и средств, а также профилактические ремонтно-восстановительные работы. Периодичность кон-



■ Рис. 3. Структурно-функциональная схема принятия решений при обслуживании МВ с мониторингом состояния под рабочим напряжением

троля параметров t_k выключателей (блок № 2) в режиме on-line определяется их фактическим состоянием, а также результатами технического обслуживания и ремонта.

Исследование нечетких иерархических моделей оценки состояния масляных выключателей

Практическая апробация возможностей использования НИМ осуществлялась на примере масляных баковых выключателей средней мощности (35 кВ). Формализация модели, расчеты и последующее моделирование производились с использованием специально разработанного программного обеспечения *ITSES*, позволяющего наглядно интерпретировать результаты оценки состояния МВ и сформировать рекомендации относительно их дальнейшей эксплуатации.

Для параметрической идентификации модели использовались статистические данные по эксплуатации выключателей на электросетевых объектах Пермского края (протоколы обследований, журналы оперативно-диспетчерских служб и т. д.) за 2010–2014 гг.

Для функций принадлежности переменных, входящих в X_1 , выбрана гауссова форма и четыре терма с вербальными оценками «Низкая», «Ниже средней», «Выше средней», «Высокая». Описание переменных x_5 и x_6 термами «Удовлетворительное», «Ниже нормы», «Неудовлетворительное» выполнено с помощью трапецидальной

и треугольной функций. Для переменных x_7-x_{11} выбраны двухэлементные («В пределах нормы», «Ниже нормы») и трехэлементные («Отсутствует», «Незначительная», «Присутствует») терм-множества с функциями принадлежности треугольного типа.

Процедура нахождения весов правил базы знаний рассматривалась как задача минимизации (рис. 4) ошибки распознавания состояний *MRE*

$$\frac{1}{K} \sum_k \Delta_k(\mathbf{X}^{(k)}, \Omega); \quad (5)$$

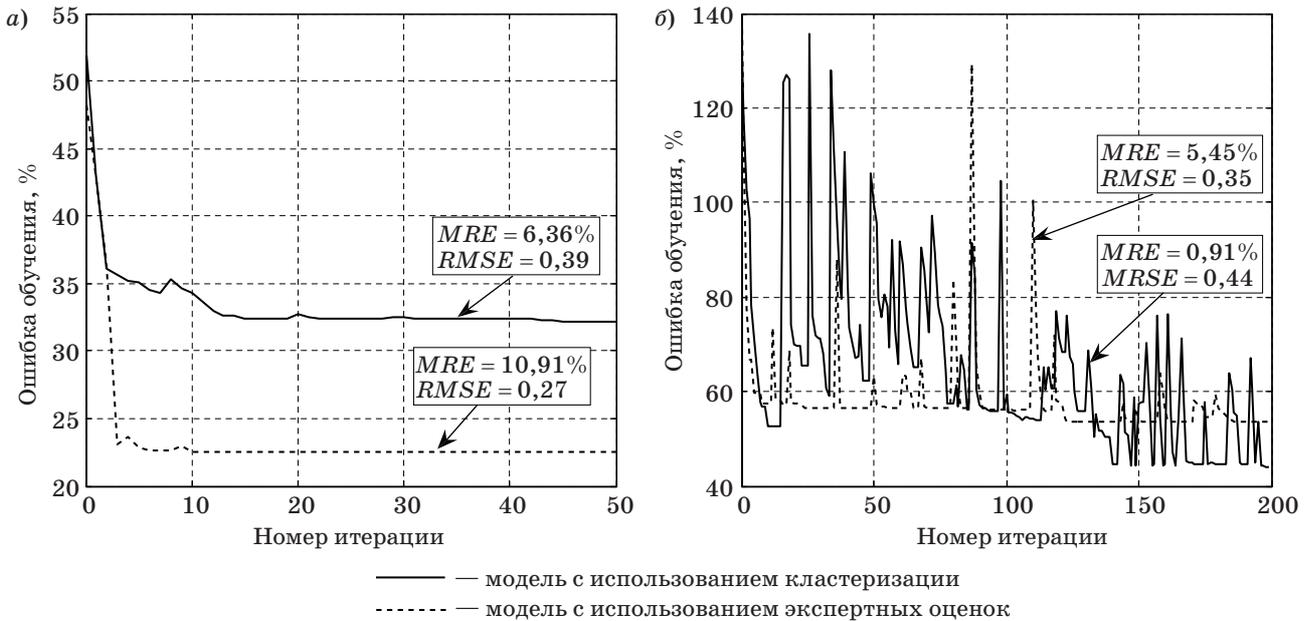
среднеквадратической невязки *RMSE* результатов моделирования и экспериментальных данных

$$\frac{1}{K} \sqrt{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L [\mu_{s_l}(Y^{(k)}) - \mu_{s_l}(\mathbf{X}^{(k)}, \Omega)]^2} \quad (6)$$

и модифицированной функции [19]

$$\sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\Delta_k(\mathbf{X}^{(k)}, \Omega) \cdot P + 1 \right] \times \sum_{l=1}^3 [\mu_{s_l}(Y^{(k)}) - \mu_{s_l}(\mathbf{X}^{(k)}, \Omega)]^2}, \quad (7)$$

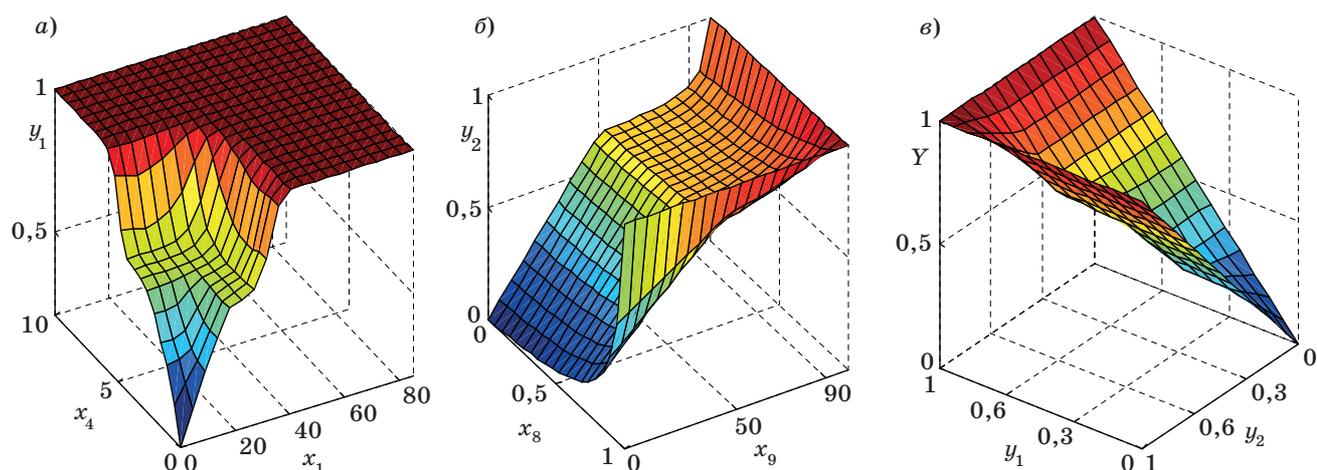
где $\mathbf{X}^{(k)}$ — вектор значений параметров выключателя из k -й строки обучающей выборки; $\mu_{s_l}(Y^{(k)})$ и $\mu_{s_l}(\mathbf{X}^{(k)}, \Omega)$ — степени принадлежности значения переменной Y в k -й строке обучающей выборки и выхода НИМ с параметрами Ω при значениях входных переменных $\mathbf{X}^{(k)}$ к решению s_l ; $\Delta_k(\mathbf{X}^{(k)}, \Omega)$ — результат распознавания состояния (равен нулю в случае успеха и единице в случае ошибки); P — коэффициент увеличения приоритета ошибочно распознанных состояний (при расчетах эмпирически выбран равным 17).



■ Рис. 4. Динамика процесса параметрической оптимизации НИМ для оценки состояния МВ: а — по критерию (5); б — по критерию (6)

■ Таблица 5. Оценка адекватности НИМ экспериментальным данным

Тип модели	Способ параметрической оптимизации	Оценка по критерию			
		Обучающая выборка		Полная выборка	
		<i>MRE</i>	<i>RMSE</i>	<i>MRE</i>	<i>RMSE</i>
На основе нечеткой кластеризации	Выражение (5)	3,63	0,53	4,29	0,38
	Выражение (6)	6,36	0,39	6,19	0,30
	Выражение (7)	0,91	0,44	2,38	0,29
На основе экспертных оценок	Выражение (5)	7,27	0,48	6,19	0,39
	Выражение (6)	10,91	0,27	12,85	0,21
	Выражение (7)	5,45	0,35	5,71	0,24



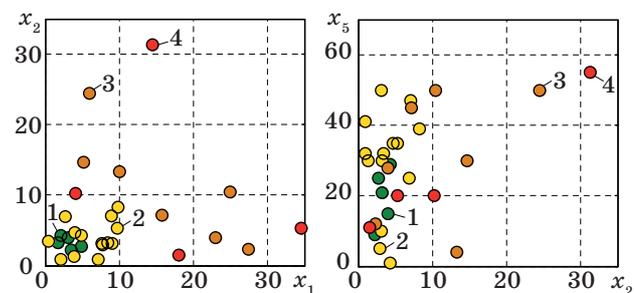
■ **Рис. 5.** Функции отклика: *a* — переменной y_1 при значениях x_2 и x_3 , равных 0°C ; *b* — переменной y_2 при $x_5 = 10\%$ и значениях x_6, x_7, x_{10}, x_{11} , равных нулю; *c* — выходной переменной Y

Результаты тестирования НИМ, построенных с учетом различных подходов к выбору параметров функций принадлежности (табл. 5), указывают на высокий уровень точности моделирования в сравнении с заключениями специализированных организаций.

Функциональные зависимости состояния МВ от результатов проведения визуального и тепловизионного обследований (рис. 5, *a–c*) имеют нелинейный характер, подтверждая гипотезу о сложно формализуемом характере задачи диагностики выключателей.

Связи значений параметров МВ, измеренных в ходе мониторинга, с уровнем их фактического состояния, оцененного при помощи программы *ITSES*, выборочно показаны на рис. 6.

Полученные оценки состояния выключателей использованы при определении направлений их дальнейшей эксплуатации, что позволило выявить ряд наиболее распространенных типов дефектов, преимущественно теплового характера, и предупредить их дальнейшее развитие.



■ **Рис. 6.** Пример оценки состояния МВ при заданных наборах значений диагностических параметров по классам: 1 — «В норме»; 2 — «Удовлетворительное»; 3 — «Ниже нормы»; 4 — «Критическое»

Заключение

В работе предложен метод комплексной оценки технического состояния высоковольтных выключателей по результатам мониторинга их ключевых диагностических параметров на основе построения НИМ.

Результаты исследования НИМ показывают, что для моделей, использующих алгоритмы кластеризации при формировании функций принадлежности и составной критерий оптимизации, количество ошибочно распознанных состояний МВ снижается в среднем до 10 %.

Эффект от практического использования данных результатов зависит от вида верно или неверно распознанного состояния выключателя и связан со снижением времени его простоя по причине плановых или внеплановых ремонтно-эксплуатационных работ. При исследовании выключателей мощностью 35 кВ было определено, что снижение времени может составлять до 20 %. К примеру, своевременное обнаружение развившихся и критических дефектов (таких как перегрев контактных соединений, нарушение контакта дугогасительной камеры, неудовлетворительное состояние вводов и др.) позволит сократить количество внезапных отказов выключателей и избежать возможного ущерба. При этом достоверные сведения о состоянии выключателя и возможность принятия обоснованных решений позволят оптимизировать объемы ремонтных работ в том случае, когда их проведение фактически не требуется, что не свойственно системе плано-предупредительных ремонтов.

Предлагаемый подход может быть использован для комплексной оценки состояния выключателей различного типа (не только масляных) и мощности. Для этого требуется анализ необходимости корректировки/расширения перечня

контролируемых параметров, а также дополнительная структурно-параметрическая идентификация НИМ [20].

Накопление данных по мониторингу ключевых параметров выключателей и других видов электротехнического оборудования с последующей формализацией НИМ могут послужить основой для создания интегрированной информа-

ционно-диагностической системы, направленной на обеспечение безаварийного функционирования объектов электроэнергетики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ № 14-07-96000 р_урала а «Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений обеспечения безаварийной работы энергетических объектов».

Литература

1. Дорوفеев В. В., Макаров А. А. Активно-адаптивная сеть — новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. 2009. № 4. С. 29–34.
2. Ледин С. С. Интеллектуальные сети Smart Grid — будущее российской энергетики // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2010. № 11(16). С. 4–8.
3. Назарычев А. Н. Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния. — Иваново: Изд-во Иван. гос. энерг. ун-та, 2002. — 168 с.
4. Хренников А. Ю., Гольдштейн В. Г., Складчиков А. А. Расследование технологических нарушений электрооборудования подстанций // Энергоэксперт. 2011. № 5(28). С. 74–83.
5. Хорошев Н. И. Оценка технического состояния силового маслонаполненного электротехнического оборудования в различных режимах его работы // Изв. Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 4. С. 162–167.
6. Кузнецов В. И., Сазонова И. Г., Коновалова Г. А. О комплексном обследовании масляных баковых выключателей 110–220 кВ // Электрические станции. 2002. № 5. С. 77–78.
7. Петроченков А. Б. О подходах к оценке технического состояния электротехнических комплексов и систем // Изв. высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 12. С. 16–20.
8. 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. 20а–24.
9. Петроченков А. Б., Солодкий Е. М. К вопросу о подходах к анализу надежности сложных систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 121. С. 214–218.
10. 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. N 6. P. 1058–1069. doi:10.1134/S0005117915060090
11. Petrochenkov A. B. An Energy-Information Model of Industrial Electrotechnical Complexes // Russian Electrical Engineering. 2015. Vol. 85. N 11. P. 692–696. doi:10.3103/S1068371214110108
12. Елтышев Д. К. Интеллектуализация процесса диагностики состояния электротехнического оборудования // Информатика и системы управления. 2015. № 1(43). С. 72–82.
13. Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Экспертная система анализа и прогнозирования аварийных ситуаций в энергетических установках // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 59–63.
14. Хорошев Н. И., Казанцев В. П. Применение правил нечеткой логики при эксплуатации электротехнического оборудования // Электротехника. 2011. № 11. С. 59–64.
15. Костерев Н. В., Бардик Е. И., Вожаков Р. В., Куряч Т. Ю. Нечеткие алгоритмы оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования // Науч. тр. ДонНТУ. Сер. Электротехника и энергетика. 2008. № 8. С. 65–70.
16. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. — М.: Горячая Линия–Телеком, 2007. — 288 с.
17. РД 153-34.0-20.363-99. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. — М.: СПО ОРГРЭС, 2001. — 145 с.
18. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. — М.: Атомиздат, 2001. — 154 с.
19. Shtovba S. D., Pankevich O. D., Nagorna A. V. Analyzing the Criteria for Fuzzy Classifier Learning // Automatic Control and Computer Sciences. 2015. Vol. 49. N 3. P. 123–132. doi:10.3103/S0146411615030098
20. Ходашинский И. А. Идентификация нечетких систем: методы и алгоритмы // Проблемы управления. 2009. № 4. С. 15–23.

UDC 621.31:658.58:004.89

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.45

Intelligent Models for Complex Assessment of Technical Condition of High-Voltage Circuit BreakersEltyshev D. K.^a, PhD, Tech., Associate Professor, eltyshv@msa.pstu.ru^aPerm National Research Polytechnic University, 29, Komsomol'skii Pr., 614990, Perm, Russian Federation

Purpose: Early detection and prevention of defects in high-voltage circuit breakers and other electrical equipment, especially when wear and tear is high, is an important task to ensure the reliability of power supply systems. The circuit breaker operation processes are multifactorial, imposing significant limitations on the choice of methods to control their condition when the available information is often incomplete and ambiguous. One of the ways to effectively solve the problem is the use of intelligent information technologies. **Methods:** Construction of a hierarchically structured knowledge base on the basis of fuzzy implicative rules which simulate thinking of electrical staff assessing the state of a circuit breaker and its elements. **Results:** There has been proposed a method of assessing the condition of high-voltage circuit breakers by the results of monitoring with the use of formalized expert knowledge for data mining. The method is based on the selection and structural decomposition of the equipment parameters which are measured without disconnecting from the power supply and which determine the variables of the hierarchical fuzzy model. The method is step-by-step determination of the criticality level for the circuit breaker and its elements, and forming reasonable control actions to maintain their operability. This approach is characterized by the use of optimization, clustering and expert analysis algorithms for structural and parametrical identification of fuzzy models. This allows you to adapt the models to the operating conditions of the circuit breakers and accurately assess their state in the case of statistical data shortage and its accumulation. On the basis of information from actual power grid facilities, there has been developed a fuzzy model and software for the assessment of medium-power oil circuit breakers. The quality of the model was determined by comparing the simulation results with experimental data and by conclusions of specialized organizations. It has been found out that the model provides an increase in the amount of true detected states of not less than 5 % compared to the traditional data processing methods. **Practical relevance:** The use of the proposed fuzzy models in expert-diagnostic systems of power grid facilities can reduce the downtime of circuit breakers by 10–20 % due to improving the condition assessment accuracy and making reasonable and timely decisions.

Keywords — Technical Condition, Hierarchical Fuzzy Model, Knowledge Base, High-Voltage Circuit Breakers, Complex Assessment, Decision Making.

References

- Dorofeev V. V., Makarov A. A. Active-adaptive Network — a New Quality of UES of Russia. *Energoekspert*, 2009, no. 4, pp. 29–34 (In Russian).
- Ledin S. S. Intelligent Networks Smart Grid — the Future of the Russian Power Industry. *Avtomatizatsiia i IT v energetike*, 2010, no. 11(16), pp. 4–8 (In Russian).
- Nazarychev A. N. *Metody i modeli optimizatsii remonta elektrooborudovaniia ob'ektov energetiki s uchetom tekhnicheskogo sostoianiia* [Methods and Models of Power Facilities Electrical Equipment Repair Optimization Based on Technical Condition]. Ivanovo, Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet Publ., 2002. 168 p. (In Russian).
- Khrennikov A. Yu., Gol'dshtein V. G., Skladchikov A. A. The Investigation of Technological Violations of Substations Electrical Equipment. *Energoekspert*, 2011, no. 5(28), pp. 74–83 (In Russian).
- Khoroshev N. I. Assessment of Technical Condition of Power Oil-filled Engineering Equipment in Different Operation Modes. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 162–167 (In Russian).
- Kuznetsov V. I., Sazonova I. G., Konovalova G. A. About Complex Inspection of Dead-tank Oil Circuit Breakers 110–220 kV. *Elektricheskie stantsii*, 2002, no. 5, pp. 77–78 (In Russian).
- Petrochenkov A. B. On Approaches to Assess the Technical State of Electrical Engineering Complexes and Systems. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2012, no. 12, pp. 16–20 (In Russian).
- Petrochenkov A. B., Bochkarev S. V., Romodin A. V., Eltyshv D. K. The Planning Operation Process of Electrotechnical Equipment Using the Markov Process Theory. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82, no. 11, pp. 592–595. doi:10.3103/S1068371211110113
- Petrochenkov A. B., Solodkii E. M. The Question of Approach to Analyzing the Reliability of Complex Systems. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2011, no. 121, pp. 214–218 (In Russian).
- 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, no. 6, pp. 1058–1069. doi:10.1134/S0005117915060090
- Petrochenkov A. B. An Energy-information Model of Industrial Electrotechnical Complexes. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 85, no. 11, pp. 692–696. doi:10.3103/S1068371214110108
- Eltyshev D. K. Intellectualization of Diagnostics of Electric Machinery. *Informatika i sistemy upravleniia*, 2015, no. 1(43), pp. 72–82 (In Russian).
- Gorodetsky A. E., Kurbanov V. V., Tarasova I. L. Expert System of Analysis and Forecasting Emergencies in Power Generating Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 4, pp. 59–63 (In Russian).
- Khoroshev N. I., Kazantsev V. P. Application of Fuzzy Logic Rules during Operation of Electrotechnical Equipment. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82, no. 11, pp. 632–637. doi:10.3103/S1068371211110071
- Kosterev N. V., Bardik E. I., Vozhakov R. V., Kurach T. Iu. Fuzzy Algorithms for Technical Condition Assessment and Prediction of a Residual Resource of Electrical Equipment. *Nauchnye trudy DonNTU. Ser. Elektrotekhnika i energetika*, 2008, no. 8, pp. 65–70 (In Russian).
- Shtovba S. D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* [Design of Fuzzy Systems by Means of MATLAB]. Moscow, Goriachaia Liniia-Telekom Publ., 2007. 288 p. (In Russian).
- Guidance Document 153-34.0-20.363-99. The Main Provisions of Methods of Infrared Diagnostics of Electrical Equipment and Overhead Lines. Moscow, SPO ORGRES Publ., 2001. 145 p. (In Russian).
- Guidance Document 34.45-51.300-97. The Volume and Norms of Electrical Equipment Testing. Moscow, Atomizdat Publ., 2001. 154 p. (In Russian).
- Shtovba S. D., Pankevich O. D., Nagorna A. V. Analyzing the Criteria for Fuzzy Classifier Learning. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2015, vol. 49, no. 3, pp. 123–132. doi:10.3103/S0146411615030098
- Hodashinsky I. A. Identification of Fuzzy Systems: Methods and Algorithms. *Problemy upravleniia*, 2009, no. 4, pp. 15–23 (In Russian).