

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.31:658.58:004.891

Экспертно-статистический метод оценки работоспособности электротехнического оборудования

Д.К. Елтышев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, пр. Комсомольский 29, Пермь, Россия
eltyshev@msa.pstu.ru

Статья поступила 25.09.2015, принята 1.11.2015

Исследуется вопрос оценки надежности электроэнергетических объектов как сложных распределенных систем на основе анализа данных о функционировании входящего в их состав электротехнического оборудования. Предложен метод, который позволяет совместно использовать имеющуюся экспертную и ретроспективную информацию о состоянии оборудования для построения нечетких производственных моделей, оценивающих уровень его безотказности, и их адаптации к изменению условий эксплуатации. Для повышения точности оценок работоспособности оборудования при определении параметров нечетких моделей использованы методы экспертных оценок, нечеткая кластеризация и алгоритмы оптимизации. В качестве примера применения предлагаемого метода формализован алгоритм экспертно-статистической оценки вероятности отказа высоковольтных выключателей средней мощности. Алгоритм базируется на использовании нечеткой производственной модели, входными переменными которой являются фактические наработки ресурсов ключевых элементов выключателя. Значения фактических ресурсов рассчитываются исходя из паспортных характеристик и статистики работы выключателей. На основе данных с существующих объектов электросетевого хозяйства определены структура и параметры нечетких моделей для оценки вероятности отказа масляных выключателей мощностью 35 кВ. Параметры рассчитаны двумя способами: с применением метода экспертных оценок и алгоритма нечеткой кластеризации. В ходе исследования моделей сделаны выводы о степени их адекватности экспериментальным данным. Полученные результаты имеют практическое значение для оценки и прогнозирования риска потери работоспособности высоковольтных выключателей, а также других видов электротехнического оборудования, и могут быть использованы для построения комплексной интеллектуальной системы, обеспечивающей бесперебойную работу электроэнергетических объектов.

Ключевые слова: электротехническое оборудование; фактический ресурс; экспертные и статистические данные; нечеткая производственная модель; нечеткий кластерный анализ

Expert statistical method for estimating the electrical equipment operability

D.K. Eltyshev

Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky Ave., Perm, Russia
eltyshev@msa.pstu.ru

Received 25.09.2015, accepted 1.11.2015

The article deals with the issue of reliability estimation of the electric power facilities as complex distributed systems based on analysis of the functioning of their constituent electrical equipment. A method that allows sharing expert and retrospective information about the equipment state for building fuzzy production models that assess the level of equipment reliability and their adaptation to changing conditions of equipment operation has been proposed. In order to improve the estimation accuracy of the equipment operability, methods of expert estimation have been used as well as fuzzy clustering and optimization algorithms for determining the parameters of fuzzy models. As an example of using the method proposed, an algorithm for expert statistical estimation of the average power high-voltage circuit breakers fault probability is formalized. The algorithm is based on the use of fuzzy logic model. The input variables of the model are the actual resources of the circuit breakers key elements. Their values are calculated on the assumption of passport characteristics and statistics of circuit breakers operation. Based on the data from the existing electric grid facilities structure and parameters of a fuzzy model to estimate the probability of failure of 35 kV power oil circuit breakers have been identified. The parameters have been calculated in two ways: using the method of expert assessments and fuzzy clustering algorithm. During the models research the conclusions about the degree of their adequacy to experimental data have been made. The obtained results are of practical importance for the evaluation and forecasting the risk of operability loss for high-voltage circuit breakers, as well as other types of electrical equipment. The results also can be used to build an integrated intelligent system that provides uninterrupted operation of electric power facilities.

Key words: electrical equipment; actual resource; expert and statistical data; fuzzy production model; fuzzy cluster analysis.

Введение. Безаварийная работа современных электроэнергетических объектов (ЭЭО) в условиях выработки ресурса у большинства электротехнического оборудования (ЭО) не может быть обеспечена реализацией жестко регламентированных планово-предупредительных ремонтных циклов, поскольку они не гарантируют отсутствие отказов в межремонтный период, требуют значительных финансовых вложений и могут привести к дополнительному износу элементов и узлов [1; 2]. Исследования процессов эксплуатации ЭЭО показывают [2–5], что наличие информации о состоянии ЭО является одним из определяющих факторов для качественной оценки его работоспособности, а также принятия решений относительно дальнейшего функционирования. Учитывая свойства ЭЭО (сложность, распределенность, множественность характеристик и т. д.) [3–6], на уровне принятия оперативных решений подобная информация зачастую либо отсутствует, либо имеется не в полном объеме, либо является неоднозначной. Данный фактор ограничивает применение традиционных методов [2; 7; 8] для построения функций оценки состояния ЭО и прогнозирования момента наступления отказа. Поэтому в подобной ситуации для определения надежности ЭО и повышения обоснованности решений по управлению его состоянием целесообразно использовать методы, позволяющие агрегировать и обрабатывать не только данные, накапливаемые в процессе эксплуатации ЭЭО, но и экспертные знания, формализующие опыт специалистов, компетентных в исследуемой области.

Особенности функционирования ЭЭО позволяют осуществить типизацию основных задач, решаемых при оценке надежности и работоспособности ЭО: выбор интегральных показателей, используемых для оценки работоспособности; выбор метода для расчета интегральных показателей в соответствии с фактическими и ретроспективными характеристиками его функционирования; построение модели достоверной оценки риска потери работоспособности.

Метод оценки работоспособности ЭО. Предлагаемый метод (рис. 1) предполагает определение вектора интегральных показателей \mathbf{R} , характеризующих уровень работоспособности ЭО, и оценку риска Q ее потери на основе разнородной информации различного объема и содержания.

В качестве интегральной характеристики состояния ЭО и эффективности его функционирования в рассматриваемый момент времени предлагается использовать технический ресурс оборудования [2; 9]. Под ресурсом будем понимать суммарную наработку ЭО или его элементов от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние [10]. В этом случае текущий уровень работоспособности ЭО можно оценить фактической наработкой его ресурса, которая определяется на основе анализа нормативно-технической и эксплуатационной документации, с учетом статистики и экспертного опыта обслуживания ЭО [2; 11]. В качестве показателя, оценивающего риск потери работоспособности ЭО, выбрана вероятность его отказа Q [3; 7].



Рис. 1. Концептуальная схема экспертно-статистической оценки работоспособности ЭО

Ввиду специфики ЭЭО как объекта исследования многофакторная задача оценки показателя Q относится к классу трудно формализуемых. Поэтому для построения искомой зависимости между фактическим ресурсом ЭО и его элементов и вероятностью отказа целесообразно использовать методы нечеткого моделирования [5; 9; 12; 13], что позволит совместно использовать разнородные данные для получения достоверного результата. В этом случае задача оценки работоспособности ЭО сводится к построению системы нечеткого логического вывода (НЛВ) по базе знаний следующего вида [13–15]:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[\bigcap_{i=1}^n (R_i = S_i^{jp}) \text{ с весом } w_{jp}^{<D>} \right] \rightarrow Q = D_j, \quad (1)$$

где S_i^{jp} — оценка параметра R_i из нечеткого множества S_i в соответствии с p -й частью продукционного правила $b_j, j=1:t$, связывающего значения входных переменных (ресурса ЭО) с величиной D_j (фактического уровня работоспособности); $w_{jp}^{<D>} \in [0,1]$ — вес правила.

Согласно (1) входные и выходные переменные модели оценки являются лингвистическими, а их значения задаются множеством термов с соответствующими функциями принадлежности (ФП). При различных сценариях наличия исходной информации об ЭО для построения ФП предлагается использовать методы экспертного оценивания (поиск параметров ФП A^o осуществляется путем обработки экспертной информации) [14], либо методы нечеткой кластеризации [13; 16], позволяющие определять параметры ФП A^c автоматически на основе статистических трендов. Правила, образующие базу знаний (1), формируются исходя из экспертного опыта специалистов, компетентных в вопросах эксплуатации ЭЭО. Весы (значимость) правил первоначально задаются экспертно либо принимаются равными единице. В процессе накопления статистических данных о функционировании ЭО и результатах оценки его работоспособности параметры нечеткой модели (весы продукционных правил и параметры ФП) корректируются с целью обеспечения минимального расхождения экспериментальных данных и результатов моделирования и повышения точности нахождения требуемого результата. Векторы оптимальных параметров модели W^{opt} и A^{opt} в этом случае определяются в процессе оптимизации по критерию [14; 15]:

$$Kr = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [Q^{(k)} - F(\mathbf{R}^{(k)}, \mathbf{W}, \mathbf{A})]^2} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $F(\mathbf{R}^{(k)}, \mathbf{W}, \mathbf{A})$ — результаты нечеткого моделирования при множестве значений $\mathbf{R}^{(k)} = \{\mathbf{R}_1^{(k)}, \mathbf{R}_2^{(k)}, \dots, \mathbf{R}_n^{(k)}\}$, содержащихся в обучающей выборке, и текущих значениях параметров ФП $\mathbf{A} = \{\alpha_j\}, j=1:l$, и весов $\mathbf{W} = \{w_j\}, j=1:m$ продукционных правил (продукций) с ограничениями $\alpha_j \in [\alpha_{j\min}, \alpha_{j\max}]$ и $w_j \in [w_{j\min}, w_{j\max}]$; $Q^{(k)}$ — эталонное значение вероятности отказа для k -й строки обучающей выборки.

Количественная оценка риска потери работоспособности ЭО в соответствии с (1) осуществляется по алгоритму Мамдани [14]. В этом случае степени принадлежности $\mu_{D_j}(\mathbf{R})$, связывающие значения входных переменных (вектор \mathbf{R}) с терм-оценками выходной переменной, определяются путем агрегирования степени истинности предпосылок и активизации заключенных правил базы знаний [14; 15]:

$$\mu_{D_j}(\mathbf{R}) = \bigvee_{p=1}^{k_j} [w_{jp}^{<D>} \cdot \bigwedge_{i=1}^n \mu_{S_i^{jp}}(R_i)], \quad (3)$$

где $\bigvee(\bigwedge)$ — реализация логических операций ИЛИ (И) путем нахождения максимума (минимума) нечетких множеств.

Нечеткое множество для выходной переменной $\mu_D(Q)$ определяется агрегированием оценок

$$\left(\frac{\mu_{D_1}(\mathbf{R})}{D_1}, \dots, \frac{\mu_{D_l}(\mathbf{R})}{D_l} \right) [14, 15]:$$

$$\mu_D(Q) = \max(\mu_{D_1}(\mathbf{R}), \dots, \mu_{D_l}(\mathbf{R})). \quad (4)$$

Численное значение вероятности отказа Q , соответствующее фактическим значениям вектора \mathbf{R} , находится путем преобразования (дефаззификации) нечеткого множества (3) по методу центра тяжести [14; 15]:

$$Q = \int_{Q_{\min}}^{Q_{\max}} Q \mu_D(Q) dQ / \int_{Q_{\min}}^{Q_{\max}} \mu_D(Q) dQ. \quad (5)$$

Формализация показателей работоспособности на примере высоковольтных выключателей. Высоковольтные выключатели (ВВ) относятся к категории особо ответственных элементов ЭЭО, обеспечивающих функционирование всей системы поставки электроэнергии потребителям в различных режимах ее работы. В качестве интегральных характеристик состояния ВВ выбраны его фактический механический ресурс R_M и коммутационный ресурс R_K [3; 17–19]. В качестве единиц измерения характеристик для удобства интерпретации их значений используется шкала относительных единиц (от 0 до 1).

Фактическая относительная наработка механического ресурса ВВ (состояние привода) определяется количеством циклов «включение – произвольная пауза – отключение» (ВО) без тока в его главной цепи [19]:

$$R_M^* = \frac{N_{BO}}{N_0}, \quad (6)$$

где N_0 и N_{BO} — допустимое и фактическое число циклов ВО, установленное в паспортных данных на выключатель и реально выполненное в процессе его эксплуатации.

Фактический относительный коммутационный ресурс характеризует состояние дугогасительной камеры и контактной системы выключателя и определяется выражением [3]:

$$R_K^* = R_0^* + \sum_{h=1}^H \left(\int_0^{R_h^*} e^{-\frac{(I_h^*-1)r}{\Delta I^*}} dr - R_h^* \right), \quad (7)$$

где R_0^* — количество коммутаций (наработка) выключателя в нормативных условиях на момент расчета (отнесенное к нормативной величине); R_h^* — относительное количество коммутаций выключателя в нормативных условиях в h -ом периоде работы; h — количество коммутаций в условиях, отличных от нормативных; I_h^* — относительное (по номинальной величине) значение тока отключения при h -й коммутации; ΔI^* — относительное расчетное отклонение тока нагрузки.

На рис. 2 приведены зависимости наработки коммутационного ресурса (в абсолютных и относитель-

ных единицах) для ВВ малой мощности, наиболее типичных для объектов электросетевого комплекса

Пермского края.

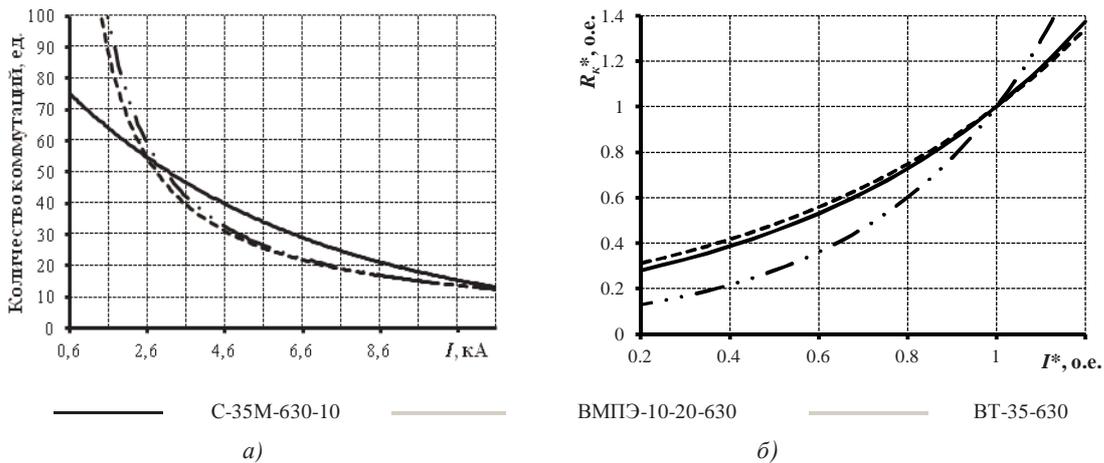


Рис. 2. Зависимость нормативного числа коммутаций (а) и относительной наработки ресурса R_k^* (б) от величины коммутируемого тока I^* для различных типов высоковольтных выключателей

Для построения зависимостей в соответствии с (7) использованы паспортные характеристики оборудования (табл. 1) и методика, приведенная в [18]. Относи-

тельные приращения ΔI^* для выражения (7) определены расчетным способом в отношении предельного тока отключения $I_{o,ном}$.

Таблица 1

Технические характеристики высоковольтных выключателей для расчета наработки ресурса

Тип выключателя	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, I_0 , кА	Номинальный ток отключения, $I_{o,ном}$, кА	$R_m, оп.$	$R_k, оп.$		$\Delta I, кА$	$\Delta I^*, о.е.$
					При I_0	При $I_{o,ном}$		
С-35М-630-10	35	0,63	10	5000	75	17	6,31	0,631
ВМПЭ-10-20-630	10	0,63	20	1500	–	10	7,83	0,392
ВТ-35-630	35	0,63	12,5	3000	–	15	8,56	0,685

Нечеткая модель оценки работоспособности высоковольтных выключателей. Оценка работоспособности (вероятности отказа) выключателей Q осуществляется на основе формализации зависимости $\mathbf{R} = \{R_m^*, R_k^*\} \rightarrow Q$ в виде нечеткой продукционной модели с входными лингвистическими переменными (ЛП) $R_1 = \{S_{11}, S_{12}, S_{13}\}$ и $R_2 = \{S_{21}, S_{22}, S_{23}\}$, характеризующими оценки ресурсов выключателя, а также выходной ЛП $Q = \{D_1, D_2, D_3, D_4, D_5\}$. Значения входных и выходной переменных заданы на интервале [0, 1].

Нечеткие термы S_{i1}, S_{i2} и $S_{i3}, i = 1, 2$ соответствуют оценкам наработки выключателя: «малая» (выключатель недавно введен в эксплуатацию либо прошел капитальный ремонт), «средняя» (выключатель способен надежно отключить указанный в паспортных данных ток короткого замыкания), «высокая» (выключатель не способен должным образом выдержать следующий цикл отключения тока короткого замыкания).

Нечеткие термы $D_j, j = 1:5$ соответствуют оценкам вероятности отказа выключателя: «низкая» (Н) (вероятность отказа минимальна), «ниже среднего» (НС), «средняя» (С), «выше среднего» (ВС), «высокая» (В) (высокий риск отказа).

Типовые (для каждого вида выключателей) ФП термов входных ЛП модели являются трапецидаль-

ными (формируются экспертно) или гауссовыми [15]. Отличие предлагаемого решения от приведенного в [17] состоит в возможности автоматического определения параметров гауссовых ФП путем нечеткого кластерного анализа [13] при наличии статистики эксплуатации конкретной модели выключателя.

Терм-оценки выходной ЛП нечеткой модели заданы гауссовыми ФП с координатами центров максимума $\{0, 0,1, 0,25, 0,5, 0,75, 1\}$ (рис. 3).



Рис. 3. Вид функций принадлежности термов выходной ЛП нечеткой модели по оценке вероятности отказа ВВ

База знаний $\mathbf{B} = \{b_1, \dots, b_9\}$ модели включает следующие нечеткие продукции:

$$b_1: \text{ЕСЛИ } R_1 = S_{11} \text{ И } R_2 = S_{11}, \text{ ТО } Q = D_1;$$

$$b_2: \text{ЕСЛИ } R_1 = S_{11} \text{ И } R_2 = S_{22}, \text{ ТО } Q = D_2;$$

- b_3 : ЕСЛИ $R_1 = S_{11}$ И $R_2 = S_{23}$, ТО $Q = D_3$;
- b_4 : ЕСЛИ $R_1 = S_{12}$ И $R_2 = S_{11}$, ТО $Q = D_2$;
- b_5 : ЕСЛИ $R_1 = S_{12}$ И $R_2 = S_{22}$, ТО $Q = D_3$;
- b_6 : ЕСЛИ $R_1 = S_{12}$ И $R_2 = S_{23}$, ТО $Q = D_4$;
- b_7 : ЕСЛИ $R_1 = S_{13}$ И $R_2 = S_{21}$, ТО $Q = D_4$;
- b_8 : ЕСЛИ $R_1 = S_{13}$ И $R_2 = S_{22}$, ТО $Q = D_4$;
- b_9 : ЕСЛИ $R_1 = S_{13}$ И $R_2 = S_{23}$, ТО $Q = D_5$.

Процедура НЛВ по базе знаний выполняется в соответствии с выражениями (2)–(5), в результате чего определяется численное значение фактической вероятности отказа выключателя, характеризующей риск снижения его работоспособности. Основные этапы процесса оценки работоспособности выключателей приведены на рис. 4.

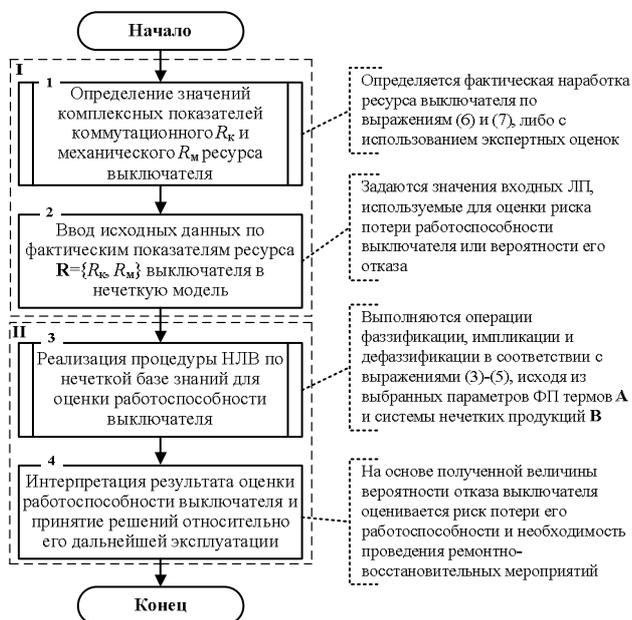


Рис. 4. Алгоритм реализации экспертно-статистического метода для оценки вероятности отказа высоковольтных выключателей: I — формирование исходной информации; II — вычисление и обработка фактического результата

Исследование метода на примере оценки работоспособности масляных выключателей. На рис. 5 представлены ФП нечетких множеств (термов) входных ЛП модели оценки вероятности отказа для масляных баковых выключателей типа С-35М после настройки ее параметров по критерию (2). Параметры ФП получены экспертно и при помощи нечеткого кластерного анализа. В табл. 2 приведен итоговый вид нечетких баз знаний.

Для поиска оптимальных параметров модели W^{opt} и A^{opt} использованы ретроспективные данные о состоянии реально действующих выключателей С-35М (средний срок службы — более 25 лет), полученные с объектов ПРУ ООО «Лукойл-Энергосети».

Расчет фактической наработки коммутационного и

механического ресурсов выключателей выполнялся по выражению (7) в соответствии с паспортными характеристиками оборудования (табл. 1), данными оперативных журналов диспетчерских служб о количестве коммутаций токов короткого замыкания, а также статистическими данными о среднегодовом количестве циклов выключателя «включение – произвольная пауза – отключение» [19]. Дополнительная оценка вероятности отказа выключателей выполнена с использованием методики [3], статистических данных по отказам выключателей [7] и данных об их фактической эксплуатации.

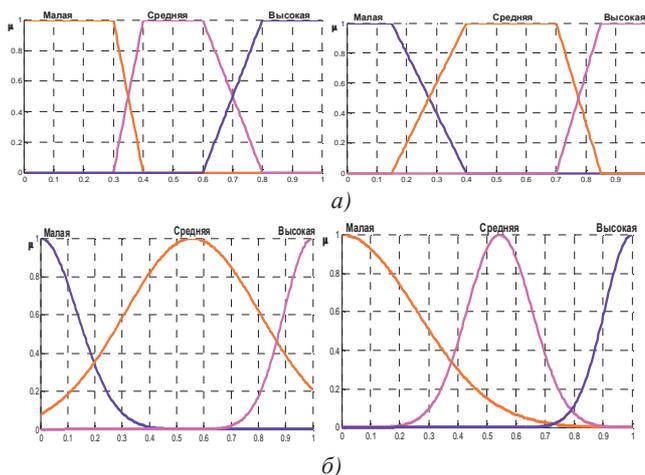


Рис. 5. Вид ФП нечетких множеств входных ЛП R_1 и R_2 нечеткой модели оценки вероятности отказа выключателей С-35М после оптимизации: а) при экспертном способе построения; б) при построении на основе кластерного анализа

Таблица 2

База знаний по оценке вероятности отказа выключателя С-35М

Оценки параметров и веса нечетких продукционных правил		Наработка механического ресурса, R_2					
		Малая		Средняя		Высокая	
Наработка коммутационного ресурса, R_1	Малая	Н	0,206	НС	0,033	С	0,773
			0,962		0,046		0,871
	Средняя	НС	0,446	С	0,024	ВС	0,052
			0,335		0,017		0,340
	Высокая	ВС	0,001	ВС	0,039	В	0,005
			0,001		0,752		0,946

ПРИМЕЧАНИЕ. В верхних ячейках приведены численные значения весовых коэффициентов для модели, использующей экспертный способ построения ФП, в нижних — для модели, использующей алгоритм нечеткой кластеризации.

В табл. 3 приведены данные по тестированию нечетких моделей оценки работоспособности выключателей С-35М при экспертном и автоматическом способах построения ФП термов входных переменных. Полученные результаты указывают на адекватность моделей, а также на повышение степени соответствия модельных и экспериментальных данных при использовании алгоритмов нечеткой кластеризации.

Результаты оценки адекватности моделей экспериментальным данным

Способ задания ФП входных переменных в нечеткой модели	Значение критерия					
	Обучающая выборка			Тестирующая выборка		
	<i>RMSE</i>	ν	<i>MAPE</i>	<i>RMSE</i>	ν	<i>MAPE</i>
Модель, использующая нечеткую кластеризацию	0,014	0,064	3,960	0,009	0,056	4,063
Модель, использующая экспертные оценки	0,021	0,102	6,690	0,013	0,082	6,419

ПРИМЕЧАНИЕ. *RMSE* — среднеквадратическая невязка экспериментальных и модельных данных; ν — коэффициент несоответствия Тейла; *MAPE* — средняя относительная ошибка, %.

На рис. 6 приведены результаты тестовой оценки вероятности отказа выключателей С-35М, а также графическая интерпретация ее функциональной зависимости

от значений параметров коммутационного и механического ресурсов.

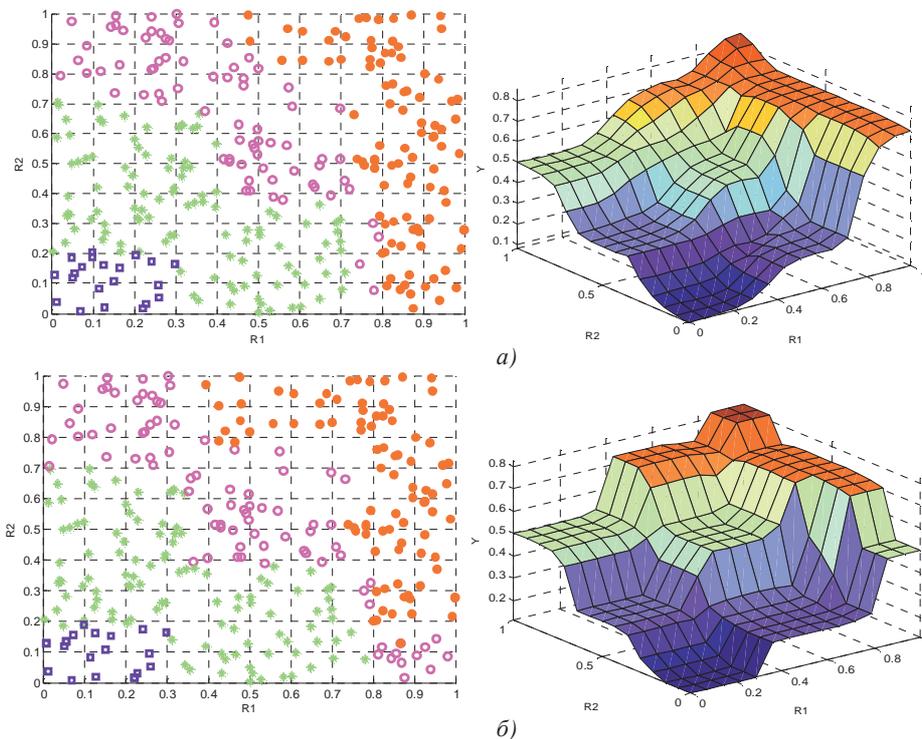


Рис. 6. Визуализация результатов работы моделей по оценке работоспособности выключателей С-35М: а) для модели, использующей нечеткую кластеризацию; б) для модели, использующей экспертные оценки

Заключение

Предложенный в статье метод дает возможность интегрировать экспертную и статистическую информацию при оценке риска снижения работоспособности (надежности) элементов систем электроснабжения различного масштаба и конфигурации в условиях неопределенности исходных данных.

Полученная в статье модель оценки работоспособности выключателей С-35М является типовой и может быть адаптирована под специфику выключателей с другими функциональными характеристиками при накоплении соответствующих экспертных и статистических данных. Поэтому развитию метода существенно будет способствовать организация на ЭЭО налаженной системы мониторинга [16; 20] показателей работоспособности не только выключателей, но и других типов ЭО на всем интервале их эксплуатации. Агрегирование результатов мониторинга и оценки состояния ЭО по-

зволит в перспективе построить комплексную интеллектуальную систему, направленную на обеспечение безаварийной работы ЭЭО, и повысить эффективность управленческих решений, принимаемых на уровне планирования мероприятий по поддержанию работоспособности оборудования и надежности всей системы поставки электроэнергии потребителям в различных режимах ее работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-07-96000

Литература

1. Бочкарев С.В., Петроченков А.Б., Ромодин А.В. Интегрированная логистическая поддержка эксплуатации электро-технических изделий. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. 398 с.

2. Петроченков А.Б. О подходах к оценке технического состояния электротехнических комплексов и систем // Изв. Выш. учеб. заведений - Машиностроение. 2012. № 12. С. 16-20.

3. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования // Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т. 2005. С. 221-224.

4. Хорошев Н.И. Оценка технического состояния силового маслонаполненного электротехнического оборудования в различных режимах его работы // Изв. Том. политехн. ун-та. 2013. Т. 323, № 4. С. 162-167.

5. Бочкарев С.В., Елтышев Д.К. Методика принятия оптимальных решений при ремонте высоковольтного электротехнического оборудования // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С.142-146.

6. 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: сб. Томск, 2009. Т. 2. С. 136-142.

7. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1990. 208 с.

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. Костерев Н.В., Бардик Е.И., Вожаков Р.В., Курач Т.Ю. Нечеткие алгоритмы оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования // Научные труды ДонНТУ. 2008. № 8. С. 65-70.

10. ГОСТ 27002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введ. 1991-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1989. 37 с.

11. Petrochenkov A.B., Romodin A.V. Energy-optimizer complex // Russian Electrical Engineering, 2010. Vol. 81, № 6. P. 323-327.

12. Хорошев Н.И., Казанцев В.П. Применение правил нечеткой логики при эксплуатации электротехнического оборудования // Электротехника. 2011. № 11. С. 59-64.

13. Елтышев Д.К. Интеллектуализация процесса диагностики состояния электротехнического оборудования // Информатика и системы управления. 2015. № 1 (43). С. 72-82.

14. Shtovba S. Ensuring accuracy and transparency of mamdani fuzzy model in learning by experimental data // Journal of Automation and Information Sciences. 2007. Vol. 39, № 8. P. 39-52.

15. Rotshtein A., Shtovba S. Identification of a nonlinear dependence by a fuzzy knowledgebase in the case of a fuzzy training set // Cybernetics and Systems Analysis, 2006. Vol. 42, № 2. P. 176-182.

16. Петроченков А.Б., Кычкин А.В., Темичев А.А. Интегрированная диагностическая поддержка распределенной системы мониторинга энергоданных // Автоматизация. Современные технологии. 2014. № 9. С. 10-16.

17. Бардик Е.И., Костерев Н.В., Литвинов В.В. Нечеткое моделирование технического состояния высоковольтных выключателей энергосистем // Научные вестники НТУУ «КПИ». 2011. № 1. С. 12-18.

18. Методические указания по определению расхода коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации. М.: ОРГРЭС, 1992. 9 с.

19. Неклепаев Б.Н., Востросаблин А.А. Механическая и коммутационная износостойкость выключателей // Промышленная энергетика. 1992. № 8. С. 14-16.

20. Petrochenkov A.B. Regarding life-cycle management of electrotechnical complexes in oil production // Russian Electrical Engineering. 2012. Vol. 83, № 11. P. 621-627.

Reference

1. Bochkarev S.V., Petrochenkov A.B., Romodin A.V. Integrated logistic support: Perm' Izd-vo Perm. gos. tekhn. un-ta, 2009. 398 p.

2. Petrochenkov A.B. On approaches to assess the technical state of electrical engineering complexes and systems // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 2012. № 12. P. 16-20.

3. Nazarychev A.N., Andreev D.A. Methods and mathematical models of complex technical condition assessment of electrical equipment // Ivanovo: IGEU. 2005. P. 221-224.

4. Khoroshev N.I. Assessment of technical condition of power oil-filled engineering equipment in different operation modes // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2013. Т. 323, № 4. P. 162-167.

5. Bochkarev S.V., Eltyshv D.K. Methods of optimal decision making in the repair of high-voltage electrical equipment // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2012. № 6. P. 142-146.

6. Eltyshv D.K., Petrochenkov A.B., Bochkarev S.V. On the question of the genetic methods application to solve the problems of electrical equipment life cycle support // Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki: sb. Tomsk, 2009. Т. 2. P. 136-142.

7. Guk Yu.B. Theory of reliability in the electricity industry. L.: Energoatomizdat. Leningr. otd., 1990. 208 p.

8. 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. № 11. P. 20a-24.

9. Kosterev N.V., Bardik E.I., Vozhakov R.V., Kurach T.Yu. Fuzzy algorithms for technical condition assessment and prediction of residual life of electrical equipment // Nauchnye trudy DonNTU. 2008. № 8. P. 65-70.

10. GOST 27002-89. The reliability of the technique. Basic concepts. Terms and Definitions. Vved. 1991-07-01. M.: Izd-vo standartov, 1989. 37 p.

11. Petrochenkov A.B., Romodin A.V. Energy-optimizer complex // Russian Electrical Engineering. 2010. Vol. 81, № 6. P. 323-327.

12. Khoroshev N.I., Kazantsev V.P. Application of fuzzy logic rules during operation of electrotechnical equipment // Russian Electrical Engineering. 2011. № 11. P. 59-64.

13. Eltyshv D.K. Intellectualization of diagnostics of electric machinery // Information Science and Control Systems. 2015. № 1 (43). P. 72-82.

14. Shtovba S. Ensuring accuracy and transparency of mamdani fuzzy model in learning by experimental data // Journal of Automation and Information Sciences. 2007. Vol. 39, № 8. P. 39-52.

15. Rotshtein A., Shtovba S. Identification of a nonlinear dependence by a fuzzy knowledgebase in the case of a fuzzy training set // Cybernetics and Systems Analysis. 2006. Vol. 42, № 2. P. 176-182.

16. Petrochenkov A.B., Kychkin A.V., Temichev A.A. Integrated diagnostic support distributed monitoring system of energy data // Automation and modern technology. 2014. № 9. P. 10-16.

17. Bardik E.I., Kosterev N.V., Litvinov V.V. Fuzzy modeling of a technical condition of high-voltage switches // Research Bulletin of NTUU «KPI». 2011. № 1. P. 12-18.

18. Guidelines for determining the costs of switches commutation resource during operation. M.: ORGRES, 1992. 9 p.

19. Neklepaev B.N., Vostrosablin A.A. Mechanical and commutational endurance of switches // Industrial Power Engineering. 1992. № 8. P. 14-16.

20. Petrochenkov A.B. Regarding life-cycle management of electrotechnical complexes in oil production // Russian Electrical Engineering. 2012. Vol. 83, № 11. P. 621-627.