

где $n(f_1 - f_{cen})$ – частоты боковых полос.

Эта величина и отмечается маркерами на спектре вокруг характерной частоты дефекта. При совпадении маркеров с пиками на спектре они идентифицируются как соответствующие пики боковых полос дефекта. Тем самым идентифицируется дефект. Рассогласование частот дефектов, полученных теоретически и определенных на спектре, может свидетельствовать об изменении характерных размеров деталей (например, при износе колец подшипников) или о неточностях в определении этих размеров.

Выводы.

Было создано устройство для измерения вибрации, которое позволяет измерять параметры в опасных зонах с возможностью дистанционного запуска процесса измерения и дистанционного приема данных.

Были проведены вибрационные испытания виброизмерительных модулей совместно с имеющейся аппаратурой СТД-2160 и СТД-3300 для определения и уточнения метрологических характери-

стик разработанной виброаппаратуры и настройки ее коэффициентов усиления.

Для повышения точности анализа вибрации и диагностики развивающихся дефектов по спектру была создана программа, имеющая удобный интерфейс, разработан алгоритм анализа частотных характеристик вибрации и идентификации некоторых конструктивных параметров диагностируемого оборудования.

Литература

1. Вибрации в технике : справочник / под ред. Ф. М. Дименейберга, К. С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1980. Т. 31. 544 с.
2. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов /Ф.Я. Балийкий [и др.]. М.: Наука, 1984. 120 с.
3. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В. В. Клюев [и др.] ; под ред. В.В. Клюева. 3-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 656 с.
4. Ануфриев И. Е., Смирнов А. Б., Смирнова Е. Н. MATLAB 7. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 1104 с.

УДК 620.424.1

*В.А. Алексеев, А.В. Лукьянов**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Рассматривается возможность использования алгоритмов нечеткого логического вывода для комплексной оценки технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов, а также генетических алгоритмов для последующего обучения нечеткой модели.

Ключевые слова: техническое состояние силовых трансформаторов, метод нечеткой логики, нечеткие модели, генетические алгоритмы.

Система обслуживания по фактическому состоянию. На сегодняшний день

планово-предупредительный ремонт является основным и наиболее методически

* - автор, с которым следует вести переписку.

обеспеченным видом технического обслуживания и ремонта, применяемым в промышленности. Он используется на предприятиях, где важные машины, относящиеся к основному оборудованию, не дублируются полностью и где непредусмотренные остановки производства могут привести к большим потерям. К таким предприятиям, в частности, относятся предприятия, связанные с получением, преобразованием и распределением электроэнергии.

Цель планово-предупредительного ремонта заключается в исключении отказов основного электрооборудования и непредвиденных расходов путем планирования проведения технического обслуживания ранее момента среднестатистического отказа с заданной вероятностью. Однако сложность конструкций современного основного электрооборудования характеризуется разнообразием входящих в них узлов по характеру и степени нагрузок и, как следствие, различными уровнями их надежности. В реальных условиях эксплуатации не существует сильной взаимосвязи между наработкой или сроком эксплуатации и техническим состоянием оборудования, если не присутствуют эрозийные формы износа и разрушения деталей оборудования, линейно связанные с наработкой. Поэтому оптимальных сроков выполнения технического обслуживания и ремонта для сложного объекта в целом практически не существует.

Для групп однотипного оборудования многообразие и стохастический характер воздействия климатических условий, эксплуатационных факторов (режимов и продолжительности работы, характеристик рабочей и окружающей среды, продолжительности эксплуатации, качества технического обслуживания и ремонта) приводят к тому, что при одной и той же продолжительности эксплуатации однотипное электрооборудование имеет различное фактическое техническое состояние.

Исходя из этого можно сделать вывод: если планово-предупредительный ремонт широко применяется для всего парка оборудования предприятия, весьма вероятно, что выполняется значительный объем обслуживания бездефектного оборудования. Это, в свою очередь, ведет к повышению эксплуатационных затрат предприятия. Также следует отметить, что, как показывает практика, в ряде случаев надежность работы электрооборудования после запланированного технического обслуживания временно снижается вследствие потока послеремонтных отказов.

Так как нельзя предсказать действительную картину возникновения неполадок для каждой отдельной единицы электрооборудования по календарному сроку службы, планово-предупредительное техническое обслуживание не является эффективным методом. В связи с этим назрела необходимость в качественной перестройке системы технического обслуживания и ремонта на основе внедрения прогрессивных стратегий обслуживания.

Теоретические исследования и опыт эксплуатации электрооборудования за рубежом показывают, что наиболее эффективной и перспективной является система технического обслуживания и ремонта по состоянию в сочетании с использованием в ограниченных пределах стратегий технического обслуживания и ремонта по наработке. Основным принципом стратегии обслуживания и ремонта по состоянию можно считать принцип соблюдения плановости выполнения части стандартных регламентных операций по наработке, работ по техническому диагностированию и контролю объектов. Регулируемые, демонтажнo-монтажные, восстановительные работы на объектах выполняются только по результатам диагностирования и контроля.

Но для перехода к ремонту по фактическому состоянию задачей первоочередной важности является разработка теоретической базы для проведения комплекс-

ной оценки технического состояния всей номенклатуры электрооборудования, т. к. собранные в комплекс диагностические параметры позволяют судить о техническом состоянии трансформатора более объективно за счет того, что один вид контроля «подстраховывает» другой. Сравнивая данные всех видов измерений и испытаний, мы можем видеть не отдельные фрагменты, а всю картину процессов, протекающих внутри трансформатора, целиком.

В данной статье рассматривается возможность использования алгоритмов нечеткого логического вывода для комплексной оценки технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов, а также генетических алгоритмов для последующего обучения нечеткой модели.

Для анализа разнородных данных, полученных в результате различных измерений и испытаний, как уже говорилось выше, будет использоваться математический аппарат нечеткой логики, главным достоинством которого является то, что он отвечает отсутствию четких границ между классами состояния. Нечеткость границ связана с тем, что степень принадлежности к классам технического состояния – величина, непрерывно изменяющаяся от полной принадлежности к какому-либо классу до полной непринадлежности к нему. Обычное математическое понятие множества, основанное на бинарной характеристической функции, не позволяет формализовать такое описание, тогда как нечеткая логика позволяет это сделать.

Генетический алгоритм представляет собой метод, отражающий естественную эволюцию методов решения проблем, и в

первую очередь задач оптимизации. Главное достоинство этого математического аппарата состоит в том, что он очень гибок и, будучи построенным в предположении, что об окружающей среде нам известен лишь минимум информации (как это часто бывает для сложных технических систем), алгоритм успешно справляется с широким кругом проблем, особенно в тех задачах, где не существует общеизвестных алгоритмов решения или высока степень априорной неопределенности. В статье будет рассматриваться возможность использования генетических алгоритмов для нахождения таких значений правил и параметров функций принадлежности, при которых возможно будет минимизировать ошибку.

Типы диагнозов и параметры состояния силового трансформатора. Степень поврежденности силового трансформатора будем определять, исходя из следующих классов технической надежности:

D_1 – исправное состояние (возможна дальнейшая эксплуатация трансформатора без ограничений);

D_2 – неисправное состояние (дальнейшая эксплуатация трансформатора возможна только с ограничениями по времени или режиму работы);

D_3 – предельное состояние (требуется немедленный вывод трансформатора из эксплуатации).

Перечисленные классы $D_1 \div D_3$ будем считать типами диагнозов, которые подлежат распознаванию. При установлении диагноза для конкретного трансформатора будем принимать во внимание основные параметры состояния (таблица 1).

Основные параметры состояния

x_i	Названия основных параметров состояния	x_i	Названия основных параметров состояния
x_1	C_2H_2/ C_2H_4	x_{15}	температура вспышки
x_2	CH_4/H_2	x_{16}	tgδ масла при температуре 70 °С
x_3	C_2H_4/ C_2H_6	x_{17}	влажность масла
x_4	CO_2/CO	x_{18}	коэффициент абсорбции
x_5	концентрация H_2	x_{19}	коэффициент поляризации
x_6	концентрация CH_4	x_{20}	тангенс угла диэлектрических потерь изоляции
x_7	концентрация C_2H_2	x_{21}	потери холостого хода
x_8	концентрация C_2H_4	x_{22}	сопротивление короткого замыкания
x_9	концентрация C_2H_6	x_{23}	сопротивление изоляции
x_{10}	концентрация CO	x_{24}	сопротивление обмоток постоянному току
x_{11}	концентрация CO_2	x_{25}	измерение ЧР
x_{12}	пробивное напряжение	x_{26}	коэффициент прессовки обмоток
x_{13}	кислотное число	x_{27}	коэффициент прессовки магнитопровода
x_{14}	водорастворимые кислоты и щелочи	x_{28}	показания тепловизора (оценивается экспертом)

Данные параметры сгруппированы по видам измерений и испытаний и имеют следующую структуру:

- хроматографический анализ растворенных в масле газов: параметры $x_1 \div x_{11}$;
- физико-химический анализ масла: $x_{12} \div x_{17}$;
- электрические методы контроля: $x_{18} \div x_{25}$;
- вибрационный контроль: $x_{26} \div x_{27}$;
- тепловизионный контроль: x_{28} .

Нечеткая база знаний. Параметры состояния $x_1 \div x_{28}$ будем рассматривать как лингвистические переменные. Для оценки значений лингвистических переменных $x_1 \div x_{28}$ используем единую шкалу качественных термов: Н – низкий, С – средний, В – высокий (для параметров $x_1 \div x_3$ – отношения концентрации пар газов), УД – удовлетворительно, НЕУД – неудовлетворительно (для параметров $x_4 \div x_{28}$). Каждый из этих термов представляет собой нечеткое множество, заданное

с помощью соответствующей функции принадлежности.

Введем классы входных переменных состояния трансформатора, также представляющие собой лингвистические переменные:

- X_1 – состояние изоляции;
- X_2 – состояние магнитопровода;
- X_3 – состояние обмоток;
- X_4 – состояние внутренних контактных соединений;
- X_5 – состояние трансформаторного масла.

Для оценки классов входных переменных состояния $X_1 \div X_5$ будем использовать множество термов:

- A_{11} – нормальное старение изоляции (D_1);
- A_{12} – ускоренное старение изоляции (электрическое старение) (D_2);
- A_{13} – ускоренное старение изоляции (тепловое старение) (D_2);
- A_{14} – увлажнение изоляции (D_2);

- A_{15} – загрязнение изоляции (D_2);
- A_{21} – нормальное состояние магнитопровода (D_1);
- A_{22} – перегревы в магнитопроводе ($150-300^{\circ}\text{C}$) (D_3);
- A_{23} – перегревы в магнитопроводе ($300-700^{\circ}\text{C}$) (D_3);
- A_{24} – перегревы в магнитопроводе ($>700^{\circ}\text{C}$) (D_3);
- A_{25} – ослабление прессовки магнитопровода (D_2);
- A_{31} – нормальное состояние обмоток (D_1);
- A_{32} – витковые замыкания в обмотках (D_3);
- A_{33} – деформация обмоток (D_3);
- A_{34} – ослабление прессовки обмоток (D_2);
- A_{41} – исправные контактные соединения (D_1);
- A_{42} – нагрев контактных соединений ($<150^{\circ}\text{C}$) (D_2);
- A_{43} – нагрев контактных соединений ($150-300^{\circ}\text{C}$) (D_3);
- A_{44} – нагрев контактных соединений ($300-700^{\circ}\text{C}$) (D_3);
- A_{45} – нагрев контактных соединений ($>700^{\circ}\text{C}$) (D_3);
- A_{51} – нормальное старение масла (D_1);
- A_{52} – загрязнение масла (D_1);
- A_{53} – ускоренное старение масла (окисление) (D_2);
- A_{54} – плохая циркуляция масла (D_2).

Нечеткие матрицы знаний. На втором и третьем этапах обработка данных ведется с помощью нечетких матриц знаний, каждая строчка которых – нечеткое высказывание (правило) в форме «если – то», пример которого показан ниже. ЕСЛИ $x_1 = A_{1,1} \dots$ И... $x_n = A_{1,n}$ ТО $N_1 = n_{k,l}$ (2)

Пример нечеткой матрицы знаний приведен в таблице 2, где

- $x_1 \div x_9$ – параметры состояния;
- $x_1 - C_2H_2 / C_2H_4$;
- $x_2 - CH_4 / H_2$;
- $x_3 - C_2H_4 / C_2H_6$;
- x_5 – концентрация H_2 ;
- x_6 – концентрация CH_4 ;

x_7 – концентрация C_2H_2 ;

x_8 – концентрация C_2H_4 ;

x_9 – концентрация C_2H_6 ;

W_1 – весовые коэффициенты, определяющие степень уверенности эксперта в правилах матрицы знаний;

N_1 – возможные процессы, протекающие внутри трансформатора и определяемые с помощью хроматографического анализа растворенных в масле газов;

$n_{1,1}$ – нормальное состояние;

$n_{1,2}$ – частичные разряды с низкой плотностью энергии;

$n_{1,3}$ – частичные разряды с высокой плотностью энергии;

$n_{1,4}$ – разряды малой мощности;

$n_{1,5}$ – разряды большой мощности;

$n_{1,6}$ – термический дефект низкой температуры ($<150^{\circ}\text{C}$);

$n_{1,7}$ – термический дефект в диапазоне низких температур ($150-300^{\circ}\text{C}$);

$n_{1,8}$ – термический дефект в диапазоне средних температур ($300-700^{\circ}\text{C}$);

$n_{1,9}$ – термический дефект высокой температуры ($>700^{\circ}\text{C}$).

Таблица 2

Нечеткая матрица знаний «Хроматографический анализ газов, растворенных в масле»

x_1	x_2	x_3	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	W_1	N_1
Н	С	Н	Н	Н	Н	Н	Н	w_{11}	n_{11}
Н	Н	Н	В	Н	Н	Н	Н	w_{12}	n_{12}
В	Н	Н	В	Н	Н	Н	Н	w_{13}	n_{13}
С	С	С	В	Н	В	Н	Н	w_{14}	n_{14}
В	С	В	В	Н	В	Н	Н	w_{15}	n_{15}
Н	С	С	Н	Н	Н	Н	Н	w_{16}	n_{16}
Н	В	Н	Н	Н	Н	Н	В	w_{17}	n_{17}
Н	В	С	Н	В	Н	Н	В	w_{18}	n_{18}
Н	В	В	Н	В	Н	В	В	w_{19}	n_{19}

Функции принадлежности. Для нахождения функций принадлежности параметров состояния используем единую аналитическую модель.

Для этого приведем интервалы изменения каждой переменной к одному универсальному интервалу $[0,1]$ с помощью следующих соотношений:

$$\mu^j(x_i) = \tilde{\mu}^j(u), \quad (1)$$

$$u = \frac{x_i - x_i}{x_i - x_i}, \quad (2)$$

$j = \text{УД, НЕУД}$,
где $[x_i, \bar{x}_i]$ – интервал изменения переменной x_i .

Тогда аналитическая модель функций принадлежности будет иметь следующий вид

$$\tilde{\mu}^j(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u-b}{c}\right)^2}. \quad (3)$$

Параметр c определяет значения функций принадлежности в точке неопределенности (точке на графике функции принадлежности, в которой значение функции принадлежности для разных термов одинаково). Чем больше c , тем выше на графике будет находиться точка неопределенности. Параметр b показывает, какая из двух функция вычисляется в данный момент (снижающаяся от единицы до нуля или возрастающая от нуля до единицы).

Например, определим функции принадлежности для $x_{12} = 34$ кВ.

Неудовлетворительно:

$$u = \frac{34-30}{40-30}; b=0; c=0,5$$

$$\mu(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u-b}{c}\right)^2}; u=0,4; \mu(u) = 0,61$$

Удовлетворительно:

$$u = \frac{34-30}{40-30}; b=1; c=0,5$$

$$\mu(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u-b}{c}\right)^2}; u=0,4; \mu(u) = 0,41$$

Т. е. x_5 принадлежит терму «неудовлетворительно» со степенью принадлежности, равной 0.61, а терму «удовлетворительно» – со степенью, равной 0.41.

На рис. 1 приведена графическая иллюстрация функции принадлежности.

Алгоритм принятия решения. Нечеткие логические уравнения вместе с функциями принадлежности нечетких термов позволяют принимать решение о степени поврежденности силового трансформатора по следующему алгоритму:

1. Зафиксируем значения параметров состояния силового трансформатора $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_{28}^*)$.

2. Определим значения функций принадлежности $\mu^j(x_i^*)$ при фиксированных значениях параметров $x_i^*, i=1..28$.

3. Используя логические уравнения, вычислим значения функций принадлежности $\mu^{Am,j}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_{28}^*)$ при векторе состояния $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_{28}^*)$. При этом логические операции И (\bullet) и ИЛИ (\vee) над функциями принадлежности заменяются операциями определения \min и \max :

$$\begin{aligned} \mu(a) \bullet \mu(b) &= \min[\mu(a), \mu(b)], \\ \mu(a) \vee \mu(b) &= \max[\mu(a), \mu(b)]. \end{aligned} \quad (4)$$

4. При степени принадлежности одного или более элементов множества термов $A_{11}..A_{m,j}$, превышающей 0.5, элемент или элементы с такой степенью принадлежности принимаются как установленные неисправности, которым соответствуют свои классы технической надежности. При этом, если хотя бы один элемент трансформатора имеет степень поврежденности более высокую, чем остальные элементы, то трансформатору присваивается класс надежности, соответствующий

II. Моделирование и управление в технических системах

классу надежности наиболее поврежденного элемента.

Пример расчета технического состояния силового маслонаполненного трансформатора напряжением 110 кВ.

Электроустановка: подстанция Октябрьская.

Объект: Т-1.

Дата проведения измерений: 17. 02. 2009г.

Климатические условия: $T_{в} = -20^{\circ}\text{C}$, $t_{м} = +36^{\circ}\text{C}$.

1. Фиксируем значения параметров состояния силового трансформатора $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_{28}^*)$ и определяем значения функций принадлежности $\mu^i(x_i^*)$ при фиксированных значениях параметров $x_i^*, i=1...28$. Заносим данные в таблицы 3 и 4.

Таблица 3

Значения функций принадлежности для параметров состояния $x_1 \div x_3$.

x_i^*	Значения параметров состояния	Значения функций принадлежности		
		$\mu^H(x_i^*)$	$\mu^C(x_i^*)$	$\mu^B(x_i^*)$
x_1	0,009	1	0,378	0,071
x_2	2,332	0	0,14	1
x_3	5,398	0	0,08	1

Таблица 4

Значения функций принадлежности для параметров состояния $x_4 \div x_{28}$.

x_i^*	Значения параметров состояния	Значения функций принадлежности	
		$\mu^{уд}(x_i^*)$	$\mu^{неуд}(x_i^*)$
x_4	8,511	0,985	0,221
x_5	0,0193	0,212	0,995
x_6	0,045	0,047	1
x_7	0,0012	0,41	0,61
x_8	0,122	0	1
x_9	0,0226	0,047	1
x_{10}	0,0356	0,664	0,376
x_{11}	0,303	0,797	0,309
x_{12}	39	0,962	0,236
x_{13}	0,29	0,384	0,65
x_{14}	0,006	0,949	0,58
x_{15}	118	0,379	0,659
x_{16}	6,7	0,69	0,361
x_{17}	0,00143	0,753	0,329
x_{18}	1,67	1	0,167
x_{19}	2,83	0,745	0,333
x_{20}	1,13	0,937	0,248
x_{21}	1,16	0,779	0,317
x_{22}	Испытания	проводились	-
x_{23}	0,81	0,874	0,276
x_{24}	3,7	0	1
x_{25}	Испытания	проводились	-
x_{26}	0,91	0,832	0,294
x_{27}	0,89	0,768	0,322
x_{28}	Удовлетворительно		

Вычислим значения функций принадлежности для всех $\mu^{Am,j}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_{28}^*)$ при векторе состояния

$$X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_{28}^*)$$

$$\begin{aligned} \mu^{A11} &= 0,212, \mu^{A12} = 0, \mu^{A13} = 0,08, \\ \mu^{A14} &= 0, \mu^{A15} = 0, \\ \mu^{A21} &= 0,08, \mu^{A22} = 0, \mu^{A23} = 0,08, \\ \mu^{A24} &= 0,317, \mu^{A25} = 0, \\ \mu^{A31} &= 0,212, \mu^{A32} = 0,08, \mu^{A33} = 0, \\ \mu^{A34} &= 0, \\ \mu^{A41} &= 0,08, \mu^{A42} = 0,08, \mu^{A43} = 0, \\ \mu^{A44} &= 0, \mu^{A45} = 0,65, \\ \mu^{A51} &= 0,379, \mu^{A52} = 0,236, \mu^{A53} = 0,236, \\ \mu^{A54} &= 0,236. \end{aligned}$$

Элемент множества A_{45} , – нагрев контактных соединений (>700 °C) – единственный из множества термов $A_{11} \dots A_{m,j}$ имел степень принадлежности, превышающую 0,5, $\mu^{A45} = 0,65$. Трансформатору был присвоен 3 класс надежности (немедленный вывод трансформатора из эксплуатации). Он был отправлен на внеплановый ремонт, в ходе которого было установлено, что вследствие длительного влияния токов, превышающих номинальное значение, произошло обгорание контактных соединений ПБВ (переключающего устройства для регулировки напряжения без возбуждения). Хроматография смогла выявить неисправность только тогда, когда она стала критической, и потребовался немедленный вывод трансформатора из эксплуатации. Если бы состояние трансформатора отслеживалось регулярно и полно, данный дефект удалось бы ликвидировать еще на ранней стадии развития при запланированной остановке трансформатора.

Генетический алгоритм оптимизации нечеткой модели. Краткий словарь терминов, используемых в генетическом алгоритме:

Параметрический код – кодовая последовательность, составленная из параметров нечеткой модели (весовых коэффициентов или параметров функций принадлежности).

Структура – цепь, звеньями которой

являются параметрические коды.

Кроссовер – операция, при которой две структуры обмениваются своими частями.

Генетический алгоритм оптимальной настройки нечеткой модели $F(X, W, B, C)$, где X – параметры состояния, W – веса правил, B и C – параметры функций принадлежности, будет иметь следующий вид:

1. Проводим инициализацию, т. е. формирование исходного конечного множества тестируемых структур, случайным выбором заданного количества структур, сводя неизвестные параметры в один вектор

$$S = (W, B, C) = (b_{11}, c_{11}, \dots, b_{nl_i}, c_{nl_i}, w_1 \dots w_N), \quad (5)$$

где N – общее число строк в нечеткой базе знаний; l_i – количество термов-оценок входной переменной x_i ;

$l_1 + l_2 + \dots + l_n = q, i = \overline{1, n}; q$ – общее число термов.

2. Находим значения функций оценки, далее называемой ошибкой диагноза $FF(S_i)$, $i = \overline{1, K}$ по формуле

$$FF(S) = \sum_{l=1}^M \left[\sum_{j=1}^m \left[\mu^{d_j}(X^l, W, B, C) - \mu^{d_j}(X^l) \right]^2 \right] \quad (6)$$

3. Определяем пары структур первого поколения. Существуют различные методы определения пар структур первого поколения. Наиболее популярным считается так называемый *метод рулетки*. Каждой структуре может быть сопоставлен сектор колеса рулетки, величина которого устанавливается пропорциональной значению достоверности диагноза, равной $1 - FF(S)$ данной структуры. Поэтому чем достовернее диагноза, тем больше сектор на колесе рулетки. Все колесо рулетки соответствует сумме значений достоверностей диагнозов всех структур рассматриваемого множества структур. Каждой структуре, обозначаемой S_i , для $i = \overline{1, 2, \dots, N}$ (где N обозначает число структур первого поколения) соответст-

вует сектор колеса $v(S_i)$, выраженный в процентах согласно формуле

$$v(S_i) = p(S_i) \cdot 100\% \quad (7)$$

где

$$p(S_i) = \frac{1 - FF(S_i)}{\sum_{i=1}^N 1 - FF(S_i)} \quad (8)$$

3.1. Отложим ряд p_i на горизонтальной оси (рис. 3).

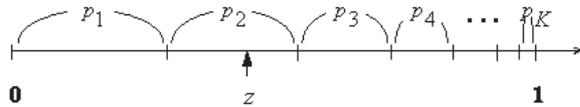


Рис. 1. Выбор структуры первого поколения.

3.2. Сгенерируем случайное число z (рис. 3), имеющее равномерный закон распределения на интервале $[0,1]$.

3.3. В качестве структуры первого поколения выберем структуру S_i , соответствующую под-интервалу p_i , в который попало число z . Например, на рис. 3 сгенерированное число z определяет в качестве структуры первого поколения S_2 .

3.4. Повторим шаги 3.1 – 3.3 для определения второй структуры первого поколения.

1. Выполняем операцию кроссовер (деление параметрических кодов и взаимнообмен их частями в каждой паре структур первого поколения). В результате операции кроссовера из двух структур первого поколения S_1 и S_2 получаем две структуры второго поколения Ch_1 и Ch_2 путем обмена частями параметрических кодов относительно $(n+1)$ -ой точки скрещивания.

а) структуры первого поколения

$$\left| b_{11}^1 | c_{11}^1 | \dots | b_{l_1}^1 | c_{l_1}^1 | \dots | b_{n_1}^1 | c_{n_1}^1 | \dots | b_{nl}^1 | c_{nl}^1 \right|$$

$|w_1^1 | \dots | w_N^1|$ – первая структура

$$\left| b_{11}^2 | c_{11}^2 | \dots | b_{l_1}^2 | c_{l_1}^2 | \dots | b_{n_1}^2 | c_{n_1}^2 | \dots | b_{nl}^2 | c_{nl}^2 \right|$$

$|w_1^2 | \dots | w_N^2|$ – вторая структура

б) структуры второго поколения

$|b_{11}^1 | c_{11}^1 | \dots | b_{l_1}^2 | c_{l_1}^2 | \dots | b_{n_1}^1 | c_{n_1}^1 | \dots | b_{nl}^2 | c_{nl}^2 |$
 $|w_1^1 | \dots | w_N^2|$ – первая структура

$|b_{11}^2 | c_{11}^2 | \dots | b_{l_1}^1 | c_{l_1}^1 | \dots | b_{n_1}^2 | c_{n_1}^2 | \dots | b_{nl}^1 | c_{nl}^1 |$
 $|w_1^2 | \dots | w_N^1|$ – вторая структура

$w_j^{S_1}$ – j -й вес правила в структуре первого поколения S_1 ,

$w_j^{S_2}$ – j -й вес правила в структуре первого поколения S_2 ,

$w_j^{Ch_1}$ – j -й вес правила в структуре второго поколения Ch_1 ,

$w_j^{Ch_2}$ – j -й вес правила в структуре второго поколения Ch_2 ,

$b_{ip}^{S_1}$ – i -й параметр b в структуре первого поколения S_1 ,

$b_{ip}^{S_2}$ – i -й параметр b в структуре первого поколения S_2 ,

$b_{ip}^{Ch_1}$ – i -й параметр b в структуре второго поколения Ch_1 ,

$b_{ip}^{Ch_2}$ – i -й параметр b в структуре второго поколения Ch_2 .

То же для параметра c .

Генерируем случайные числа z_i в количестве $(n+1)$, такие, что

$1 \leq z_i \leq l_i$, где l_i – число термов-оценок входной переменной x_i , $i = \overline{1, n}$;

$1 \leq z_{n+1} \leq N$, где N – общее число строк в нечеткой базе знаний.

Осуществляем обмен генов в соответствии с найденными значениями точек обмена z_i по правилам:

$$w_j^{Ch_1} = \begin{cases} w_j^{S_1}, & j \leq z_{n+1} \\ w_j^{S_2}, & j > z_{n+1} \end{cases},$$

$$w_j^{Ch_2} = \begin{cases} w_j^{S_2}, & j \leq z_{n+1} \\ w_j^{S_1}, & j > z_{n+1} \end{cases}, \quad 1 \leq j < N \quad (9)$$

$$b_j^{ch_1} = \begin{cases} b_{ip}^{S_1}, & p \leq z_i \\ b_{ip}^{S_2}, & p > z_i \end{cases}$$

$$b_j^{ch_2} = \begin{cases} b_{ip}^{S_2}, & p \leq z_i \\ b_{ip}^{S_1}, & p > z_i \end{cases}, 1 \leq p < l_i, i = \overline{1, n} \quad (10)$$

То же для параметра c .

2. Из полученного множества тестируемых структур второго поколения отбрасываем структуры, имеющие худшие значения ошибки диагноза $FF(S_i)$.

3. Если получена структура S_i , для которой $FF(S_i) = 0$, то конец алгоритма, иначе переходим к шагу 7.

4. Если не исчерпано заданное число шагов, то переходим к шагу 2. В противном случае структура, имеющая наименьшее значение ошибки диагноза $FF(S_i)$, представляет субоптимальное решение.

Конец алгоритма.

Выводы:

1. На основе математической модели технического состояния силового трансформатора разработана простая, не требующая многоходовых расчетов методика для комплексной оценки технического состояния силовых трансформаторов.

2. Данная математическая модель, основанная на аппарате нечеткой логики, может быть обучена с помощью генетических алгоритмов.

3. Использование программного продукта на основе нечеткой модели технического состояния силового трансформатора позволит:

- Уменьшить временные затраты на анализ данных.

- Улучшить качество оценки технического состояния оборудования за счет исключения человеческого фактора при анализе данных.

- Разработать ряд аналогичных программ комплексного анализа, охватывающих всю номенклатуру электрооборудования тяговых подстанций и локомотивов.

- Разработать программу прогнозирования остаточного ресурса, базирующуюся

на оценке комплексного анализа технического состояния электрооборудования.

- Точно планировать расходы на эксплуатацию и ремонт электрооборудования тяговых подстанций и локомотивов.

- Перейти от системы планово-предупредительных ремонтов к системе обслуживания по фактическому состоянию.

Литература

1. Аверкин А.Н., Нгуен Х. Использование нечеткого отношения моделирования для экспертных систем. М.: ВЦ АН СССР, 1988.

2. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей. Примеры использования. Рига : Зинатне, 1990.

3. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применения к принятию приближенных решений. М: Мир, 1976. 165 с.

4. Лукьянов А.В. Управление техническим состоянием роторных машин (система планово-диагностического ремонта). Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2000. 230 с.

5. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов. РД 34.46.302-89. М.: ВНИИЭ, 1989. 28 с.

6. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110...500 кВ в эксплуатации / Б. В. Ванин [и др.] // Электрические станции. 2001. № 9. С. 53-58.

7. Объем и нормы испытаний электрооборудования. 6-е изд. перераб. и доп. РД 34.45-51.300-97.М.: Изд. НЦ ЭНАС, 2001.

8. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М : Горячая Линия - Телеком, 2006. - 452 с.

9. Структура экспертно-диагностической и информационной системы оценки состояния высоковольтного оборудо-

вания / И. В. Давыденко [и др.] // Электрические станции. 1997. № 6. С. 25-27.

УДК 517.929

А.Ф. Зубова*, М.В. Стрекопытова, О.А. Зубова

РАЗБИЕНИЕ МНОГОЧЛЕНА НА ПРОИЗВЕДЕНИЕ ПРОСТЫХ МНОГОЧЛЕНОВ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА ЕВКЛИДА

На основе применения алгоритма Евклида предлагаются методы разбиения исходного характеристического многочлена на произведение многочленов, имеющих только простые корни (простые многочлены). Это позволяет не только определить кратность каждого корня исходного многочлена, но и отделить все кососимметричные корни, включающие в себя и мнимые корни этого многочлена. Такое разбиение не только ускоряет, но и упрощает любой последующий анализ и нахождение самих корней.

Ключевые слова: мнимая ось, простой корень, равенство, кратность, остаток от деления, четная степень.

Пусть задан многочлен $P(z)$ степени n , в общем случае с комплексными коэффициентами [1]

$$P(z) = a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_0. \quad (1)$$

Будем считать, что он имеет s различных корней z_j , ($j=1, \dots, s$) с кратностями k_j . Тогда по основной теореме алгебры имеет место равенство

$$P(z) = a_n \prod_{j=1}^s (z - z_j)^{k_j}, \quad \sum_{j=1}^s k_j = n. \quad (2)$$

Справедлива следующая теорема [2].

Теорема 1. Если величина z_j является корнем многочлена $P(z)$ кратности k_j , то она также является корнем многочлена $P'(z)$ кратности $k_j - 1$.

Доказательство. Перепишем равенство (2) в виде

$$P(z) = (z - z_j)^{k_j} S(z), \quad (3)$$

где величина z_j не является корнем многочлена $S(z)$ степени $n - k_j$. Продифференцировав равенство (3), получим

$$\begin{aligned} P'(z) &= k_j (z - z_j)^{k_j-1} S(z) + (z - z_j)^{k_j} S'(z) = \\ &= (z - z_j)^{k_j-1} Q(z). \end{aligned}$$

Очевидно, что величина z_j не является корнем многочлена $Q(z)$, т. к. $Q(z_j) = k_j S(z_j) \neq 0$. Отсюда вытекает, что величина z_j является корнем кратности $k_j - 1$ многочлена $P'(z)$. Теорема доказана.

Из теоремы 1 вытекает, что если величина z_j является простым корнем многочлена $P(z)$, т. е. имеет единичную кратность, то она не является корнем многочлена $P'(z)$. Таким образом, если многочлен $P(z)$ имеет только простые корни (корни единичной кратности), то многочлены $P(z)$ и $P'(z)$ не имеют общих корней.

Рассмотрим теперь, как алгоритм получения наибольшего общего делителя (НОД) двух целых чисел M и N Евклида можно применить для выделения общих корней двух заданных многочленов.

Пусть заданы два многочлена, $P(z)$ степени n и $S(z)$ степени m ($m \leq n$), с комплексными коэффициентами

* - автор, с которым следует вести переписку.