

УДК 519.711

О.М. Швец

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ЧАСТОТНОМУ СПЕКТРУ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ БАЗЫ НЕЧЕТКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ ПРАВИЛ

Разработана экспертная система классификации объектов по данным их частотного спектра. Система основана на базе нечетко-статистических правил и методе нечеткого управления. Нечеткая составляющая отражает знания эксперта, а статистическая – данные о фактическом состоянии объектов. Приведен пример решения задачи диагностики электродвигателей в условиях рабочей нагрузки.

Ключевые слова: нечетко-статистический, классификация, частотный спектр, адаптивный.

Введение

В работе представлена экспертная система (ЭС) классификации объектов по данным их частотного спектра. Основой ЭС является база нечетко-статистических правил (БНСП) [1] и метод нечеткого управления [2]. Нечеткая компонента БНСП отражает субъективные знания эксперта о частотном спектре объектов. Статистическая составляющая БНСП отображает фактический частотный спектр эталонных объектов классификации и формируется автоматически в процессе адаптации ЭС.

Пусть задано множество исследуемых объектов $B = \{b_j\}, j = \overline{1, N_B}$ и множество классов исследуемых объектов $C = \{c_l\}, l = \overline{1, N_C}$. Предлагаемая ЭС определяет степени принадлежности объекта к каждому из классов. Обозначим через $S_j^l \in [0,1]$ степень принадлежности объекта b_j классу c_l . Для формирования базы нечетких правил используется множество обучающих объектов $P = \{p_a\}, a = \overline{1, N_P}, P \subset B$. Объект b_j может быть использован в качестве обучающего объекта p_a , если эксперт установил его степень принадлежности к одному из классов $c_l, l = g$ равной единице, а к

остальным классам – ноль: $S_j^l = \begin{cases} 1, l = g \\ 0, l \neq g \end{cases}$. Принадлежность обучающего объекта p_a к классу c_l обозначим через $p_a := c_l$.

Структура экспертной системы

На рис. 1 представлена структура экспертной системы нечетко-статистической классификации объектов по частотному спектру.

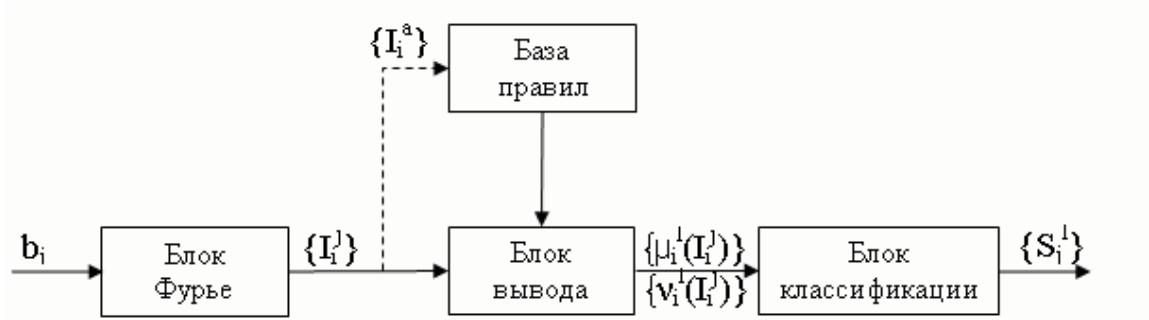


Рисунок 1 - Структура экспертной системы классификации объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил

Снятый с объекта сигнал подается на АЦП для дискретизации. Частотный спектр сигнала объекта получается посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ) [3]. Результатом БПФ является представление объекта множеством гармоник $H = \{h_i\}, i = \overline{1, N_H}$ преобразования Фурье. Частотное разрешение гармоник Δf при этом составляет $\Delta f = \frac{f_{\max}}{N_h}$ Гц, где f_{\max} - максимальная частота спектра дискретизированного сигнала исследуемого объекта. Частота h_i гармоники равна $f_i = i * \Delta f, i = \overline{1, N_H}$ Гц. Каждая гармоника в множестве $\{h_i\}$ представляется парой коэффициентов $(Re_i, Im_i), i = \overline{1, N_H}$. Для каждой гармоники преобразования Фурье вычисляется интенсивность частоты I_i согласно

$$I_i = \sqrt{Re_i^2 + Im_i^2}, i = \overline{1, N_H}. \quad (1)$$

Для построения базы правил ЭС был использован метод нечеткого управления Такаги-Сугено [2] и метод нечетко-статистического управления (НСУ) [1]. В рамках метода НСУ для вычисления принадлежности входной величины нечеткому множеству используется функция плотности ν , построенная на основе обработки статистических данных входной величины.

Для каждого класса c_l существует свое правило, определяющее степень принадлежности объекта b_j к классу c_l . Правила представлены в следующем виде:

$$R^{(l)} : IF((I_1^j \text{ is } I_1^l) AND(I_2^j \text{ is } I_2^l) \dots AND(I_{N_H}^j \text{ is } I_{N_H}^l)) \\ THEN S_j^l = f^{(l)}(\{\mu_i^l(I_i^j)\}, \{v_i^l(I_i^j)\}), \quad i = \overline{1, N_H}, \quad (2)$$

где I_i^l - нечеткое множество интенсивности i -ой гармоники l -го класса объектов, представленное функцией принадлежности μ_i^l и функцией плотности v_i^l (5); $f^{(l)}$ - функция вычисления значения степени принадлежности S_j^l объекта b_j к классу c_l .

Для формирования БНСП необходимо задать функции μ_i^l и v_i^l $l = \overline{1, N_C}, i = \overline{1, N_H}$. Функции μ_i^l определяются экспертом субъективно на основании его знаний о частотном спектре исследуемых объектов. Для определения функций v_i^l ЭС должна быть обучена на множестве обучающих объектов P . Частотный спектр каждого обучающего объекта p_a представляется множеством интенсивностей гармоник $\{I_i^a\}, i = \overline{1, N_H}$. Диапазон фактических значений I_i^a разбивается на N_T^l равных интервалов. Каждый обучающий объект p_a принадлежит некоторому классу объектов c_l . В свою очередь, каждому c_l соответствует свое значение числа интервалов $N_T^l, l = \overline{1, N_C}$. Шаг разбиения значений i -ой интенсивности гармоник I_i^a для класса объектов c_l обозначим ΔT_i^l и будем вычислять согласно

$$\Delta T_i^l = \frac{(\max_a(I_i^a) - \min_a(I_i^a))}{N_T^l}, (i = \overline{1, N_H}; l = \overline{1, N_C}; \forall a, p_a := c_l). \quad (3)$$

Обозначим через $T_{i,q}^l$ q -ый интервал значений i -ой гармоники l -го класса объектов согласно

$$T_{i,q}^l = ((q-1) * \Delta T_i^l; q * \Delta T_i^l], q = \overline{1, N_T^l}. \quad (4)$$

Плотность значений i -ой гармоники класса c_l задается при помощи функции плотности $v_i^l(I_i^j) : R_+ \rightarrow [0, 1]$, где I_i^j - величина интенсивности i -ой гармоники объекта b_j . Форма функции v_i^l задается в процессе «обучения» экспертной системы на множестве

$P = \{p_a\}, a = \overline{1, N_p}$. Значения функции v_i^l определяются следующим образом:

$$v_i^l(I_i) = \frac{\sum_a W_{i,q}^l(I_i^a)}{\max_q \sum_a W_{i,q}^l(I_i^a)}, \quad (5)$$

где q выбирается из условия $I_i \in T_{i,q}^l$, $W_{i,q}^l(I_i)$ - функция принадлежности интенсивности I_i^a к интервалу $T_{i,q}^l$. $W_{i,q}^l$ определяется согласно:

$$W_{i,q}^l(I_i) = \begin{cases} 1, I_i \in T_{i,q}^l \\ 0, I_i \notin T_{i,q}^l \end{cases}. \quad (6)$$

На вход блока вывода подается множество интенсивностей гармоник $\{I_i^j\}$ объекта b_j . Процесс вывода использует базу нечетких правил (2), что позволяет учитывать как субъективную экспертную оценку (функции μ_i^l) так и накопленные в процессе обучения ЭС данные статистики (функции v_i^l). Степень принадлежности i -ой гармоники объекта b_j 1-му классу определяется при вычислении значений функций принадлежности $\mu_i^l(I_i^j)$ и функций плотности $v_i^l(I_i^j)$ $l = \overline{1, N_c}, i = \overline{1, N_H}$.

Задачей блока классификации является вычисление значений степеней принадлежности S_j^l объекта b_j к каждому из классов c_l . В качестве входных данных для этого используются множества значений $\{\mu_i^l(I_i^j)\}$ и $\{v_i^l(I_i^j)\}$. При вычислении S_j^l также используется множество $\{G_i^l\}$, где G_i^l - значение центра интенсивности i -ой гармоники 1-го класса объектов, вычисленное согласно

$$G_i^l = (q - 0,5) * \Delta T_i^l, \quad (7)$$

где значение q выбирается из условия $\sum_a W_{i,q}^l(I_i^a) \rightarrow \max$. Значения степеней принадлежности S_j^l вычисляются согласно

$$S_j^l = \frac{\sum_i \mu_i^l(I_i^j) * v_i^l(I_i^j) * G_i^l}{\sum_i G_i^l}. \quad (8)$$

Пример использования экспертной системы

Представленная ЭС классификации объектов по частотному спектру на основе адаптивной БНСП была использована для разработки программно-аппаратного комплекса диагностики электродвигателей (ЭД). Проводилась диагностика ЭД постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов моделей ДП 0.18, ДП 0.25, МСП 0.15 и МСП 0.25. В работе [4] были исследованы альтернативные подходы к решению задачи диагностики электродвигателей методами нейронно-сетевого моделирования.

Установлено, что возникновение каждого вида неисправности приводит к появлению в спектре тока двигателя новых гармоник определенной частоты и интенсивности. Ток двигателя в режиме рабочей нагрузки подавался на АЦП: частота дискретизации составляла $f_d = 11025$ Гц, разрядность выборки - 16 бит. С целью дальнейшей программной обработки полученная последовательность дискретных значений записывалась в wav-файлы, соответствующие стандарту файлов uncompressed Microsoft PCM audio. Согласно теореме Найквиста-Котельникова максимальная частота спектра f_{\max} после дискретизации аналогового сигнала составила $f_{\max} = 0,5 * f_d = 5512,5$ Гц, что оказалось достаточным для отражения физических процессов в двигателе. Частотный спектр тока двигателя был получен с использованием БПФ. Размер блока БПФ F_s выбирался равным $F_s = 512$. В результате обработки ток двигателя был представлен множеством гармоник преобразования Фурье: $H = \{h_i\}, i = \overline{1, N_H}$, где $N_H = 0,5 * F_s = 256$. Частотное разрешение гармоник спектра Δf при этом составило $\Delta f = \frac{f_{\max}}{N_H} \approx 21,5$ Гц. Для каждой гармоники преобразования Фурье вычислялась интенсивность частоты I_i согласно (1).

Задача выявления неисправностей в различных моделях ЭД стрелочных переводов потребовала создания отдельной БНСП для каждой из моделей. Разработанное приложение позволяет осуществлять групповую диагностику множества ЭД заданной модели, используя wav-файлы рабочего тока исследуемых двигателей. Для этого пользователь должен задать модель ЭД и путь к папке, содержащей wav-файлы. Внешний вид окна разработанного

приложения и пример результатов диагностики ЭД постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов модели МСП 0.25 по станции Днепропетровск представлены на рис 2.

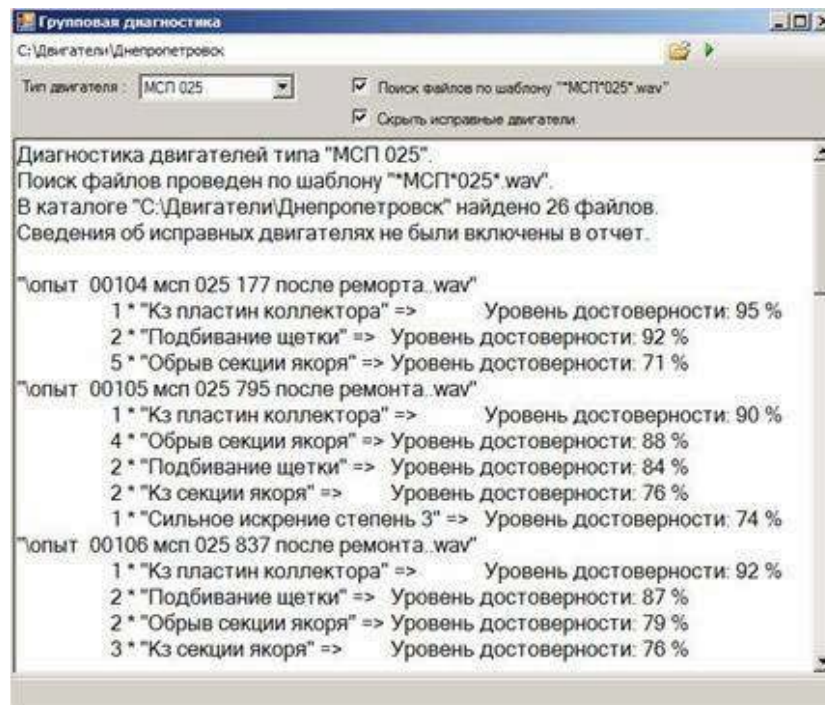


Рисунок 2 - Окно модуля групповой диагностики электродвигателей

Использование ЭС нечетко-статистической классификации по частотному спектру для решения задачи диагностики электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов позволяет обнаруживать одновременно нескольких видов неисправностей в ЭД, которые имеют место с различной степенью принадлежности. Диагностика ЭД производится в режиме рабочей нагрузки.

Выводы

Представленная экспертная система классификации объектов по данным их частотного спектра основана на методе нечетко-статистического управления, что позволяет использовать совместно знания эксперта и данные статистики. Автоматизированная адаптация базы правил ЭС осуществляется в процессе ее обучения на множестве эталонных объектов. Работоспособность ЭС подтверждена при решении задачи диагностики электродвигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скалозуб В.В. Метод и информационные технологии нечетко-статистического управления. «Системні технології», 1' (50), 2008. С. 120 – 127.
2. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006.
3. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985.
4. Скалозуб В.В., Швец О.М. Нейросетевые модели диагностики электродвигателей постоянного тока // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – №4. – С. 7-11.