

УДК 519.711.2

В. В. Скалозуб, О. М. Швец, В. Н. Осовик

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна*

МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ПАРКАМИ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ПО ТЕКУЩЕМУ СОСТОЯНИЮ

Розроблено методи та інтелектуальну систему управління парками складних залізничних об'єктів на основі параметрів поточного стану. Засобами індивідуальних моделей експлуатації електричних двигунів вирішуються завдання моніторингу, діагностування, прогнозування та визначення черговості ремонтів.

Разработаны методы и интеллектуальная система управления парками сложных железнодорожных объектов с учетом параметров текущего состояния. С помощью индивидуальных моделей эксплуатации электродвигателей решаются задачи мониторинга, диагностирования, прогнозирования и определения очередности ремонтов.

Methods and intelligent management system of complex railway objects based on the parameters of the current state. Means individual operation models of electric motors solved the problem of monitoring, diagnosis, prognosis and prioritize repairs.

Ключевые слова: интеллектуальные системы, мониторинг, диагностирование, парки технических систем, нечетко-статистические экспертные системы, эксплуатация по текущему состоянию.

Введение. Совершенствование процессов эксплуатации парков сложных технических систем железнодорожного транспорта (вагонов, локомотивов, стрелочных переводов, электродвигателей и др.) или составляющих их компонентов, с учетом параметров текущего состояния, является актуальной научно-технической проблемой [7]. Она является чрезвычайно важной для железнодорожных дорог, насчитывающих десятки и сотни тысяч единиц такого рода эксплуатируемых систем [3; 5].

В качестве объектов анализа в работе рассмотрены электродвигатели (ЭД) постоянного тока, используемые в железнодорожных стрелочных переводах – высокоответственных системах управления процессами перевозок. Отмечается, что электродвигатели широко используются в промышленности и на транспорте. Так, несколько лет тому назад только на Приднепровской железной дороге было установлено: стрелочных приводов (СП) – около 8 тыс. шт., автоматических шлагбаумов – около 1,1 тыс. шт., тяговых двигателей и главных тяговых генераторов подвижного состава – около 14 тыс. шт. Электрические машины – это дорогостоящее оборудование при закупке, эксплуатации, ремонте. В настоящее время процессы эксплуатации ЭД осуществляются на основе планово-предупредительного метода, с учетом нормирования. При этом процедуры оценки текущего состояния устройства предусматривают исключение ЭД из реальных процессов, чтобы организовать комплекс измерений значений параметров. Исключение ЭД из процессов эксплуатации, как правило, искажает оценки значений параметров состояний, а также требует существенных дополнительных финансовых, материальных и других видов затрат. В работе представлена интеллектуальная автоматизированная система, которая обеспечивает управление процессами эксплуатации парков ЭД на основе получения оценок параметров их текущего состояния, без исключения устройств из технологических производственных процессов.

Постановка задачи. Задача повышения эффективности эксплуатации парков технолого-экономических систем или их компонентов формулируется следующим образом. Рассматривается определенное множество сложных технико-технологических объектов одинакового назначения, парк технических систем, а также процессы их эксплуатации. Объекты парков характеризуются наборами свойств, значения которых указывают на их определенное «текущее» состояние, отражающее ход и возможности дальнейшей эксплуатации каждой из систем. Техническое состояние объекта на данном этапе его эксплуатации определяется по сигналам, снимаемым с него, причем без исключения систем из процессов эксплуатации. Также известны ресурсы (технические, материальные, трудовые и др.), необходимые или же выделенные для эксплуатации парка объектов.

Ставится задача повышения эффективности эксплуатации парка объектов на основе создания интеллектуальной автоматизированной технологии и системы управления процессами эксплуатации парка технических объектов по текущему состоянию. При этом требуется определить текущее техническое состояние компонентов системы (мониторинг технического состояния) без исключения их процессов эксплуатации, а также обеспечить раннее обнаружение скрытых неисправностей. Результатом монито-

ринга является оценка принадлежности объекта к классу исправного или к классу неисправного состояния. Если выявлено неисправное состояние объекта, то требуется определить вид неисправности и получить оценку достоверности. На основе данных мониторинга объектов требуется спрогнозировать возможные изменения технического состояние элементов системы, а также установить рациональную очередность восстановления элементов с учетом требований по безопасности транспортной системы и ограниченных ресурсов процессов эксплуатации.

Решение приведенной выше задачи по автоматизированной эксплуатации парков технолого-экономических систем позволит своевременно оценить техническое состояние контролируемых элементов систем, обеспечить возможность повышения безопасности как отдельных объектов, так и транспортной системы в целом. Своевременная диагностика позволит снизить издержки, вызванные простоем элементов системы, и уменьшить затраты на их восстановление. Прогнозирование технического состояния объектов позволит реализовать оптимальное планирование процессов эксплуатации «по текущему состоянию».

Метод решения. Решение вопросов автоматизации процессов эксплуатации парков технических систем выполним на основе методов экспертных систем (ЭС). В работе [7] представлена экспертная система классификации объектов по данным их частотного спектра. Основой ЭС является база нечетко-статистических правил (БНСП) [2] и метод нечеткого управления [1]. 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.

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

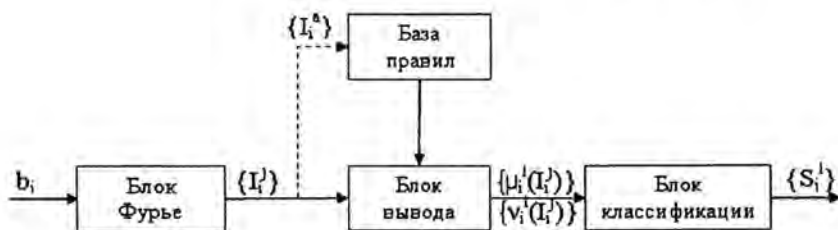


Рис. 1. Структура экспертной системы классификации объектов управления

Экспертная система (рис. 1) выполняет классификацию объектов управления по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил и обобщения метода нечеткого управления [4]. В ЭС блок Фурье реализует быстрое преобразование Фурье (БПФ), а также процедуры фазификации [1; 4] характеристик входных сигналов.

Снятый с объекта сигнал подается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для дискретизации. Частотный спектр сигнала объекта получается посредством БПФ, результатом которого 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 [1] и метод нечетко-статистического управления (НСУ) [3]. 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 состояний объектов c_l существует свое правило, определяющее степень принадлежности объекта b_j к классу c_l . Правила представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} R^{(l)} : IF \left((I_1^l \text{ is } I_1^l) AND (I_2^l \text{ is } I_2^l) \dots AND (I_{N_H}^l \text{ is } I_{N_H}^l) \right), \\ THEN S_j^l = f^{(l)} \left(\{ \mu_i^l (I_i^l) \}, \{ \nu_i^l (I_i^l) \} \right), \quad i = \overline{1, N_H} \end{aligned} \quad (2)$$

где I_i^l – нечеткое множество интенсивности i -ой гармоники l -го класса объектов, представленное функцией принадлежности μ_i^l и функцией

плотности ν_i^l ; $f^{(l)}$ – 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 ν_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 ν_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 $N_T^l, l = \overline{1, N_C}$.

Представленная ЭС классификации объектов по частотному спектру на основе адаптивной БНСП была использована для разработки программно-аппаратного комплекса диагностики электродвигателей. Проводилась диагностика ЭД постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов моделей ДП 0.18, ДП 0.25, МСП 0.15 и МСП 0.25.

Реализация интеллектуальных информационных технологий – эксплуатация парков электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов

В настоящее время электродвигатели постоянного тока широко используются в промышленности и на железнодорожном транспорте, где обслуживание и ремонт ЭД стрелочных переводов выполняется по плано-во-предупредительному методу. При этом проводится исключение ЭД из эксплуатации, что требует значительных материальных и временных ресурсов. Ремонт и замена стрелочных приводов происходит согласно принятым нормативам, что часто ведет к преждевременному капитальному ремонту двигателя с неиспользованным ресурсом. Для парков ЭД важной и все более актуальной задачей является переход к обслуживанию с учетом текущего технического состояния ЭД. Для автоматизированного решения этой задачи необходимо разработать эффективную технологию, соответствующие модели и методы, а также создать программно-

технические средства для эксплуатации парков ЭД. При этом требуется обеспечить своевременную оценку фактического состояния двигателей, а в случае исчерпания технических ресурсов – указать на необходимость их замены, или определить очередность ремонтов ЭД в условиях ограниченных временных и других ресурсов.

Общая схема разработанной автоматизированной системы управления эксплуатацией (АСУЭ) парка электродвигателей (ПЭД) представлена на рис. 3 [4]. Здесь показано, что кабели, питающие стрелочные двигатели, сводятся в специальное помещение, «релейную», где происходит снятие кривой тока электродвигателей. Это позволяет реализовать постоянный контроль технического состояния всех стрелочных электродвигателей на станции без исключения ЭД из процесса эксплуатации.

На рис. 2 приведены примеры графиков спектров электродвигателя МСП-0.25 для следующих типов неисправностей: а) короткое замыкание пластин коллектора; б) короткое замыкание секции якоря; в) круговой огонь по коллектору; г) обрыв секции якоря.

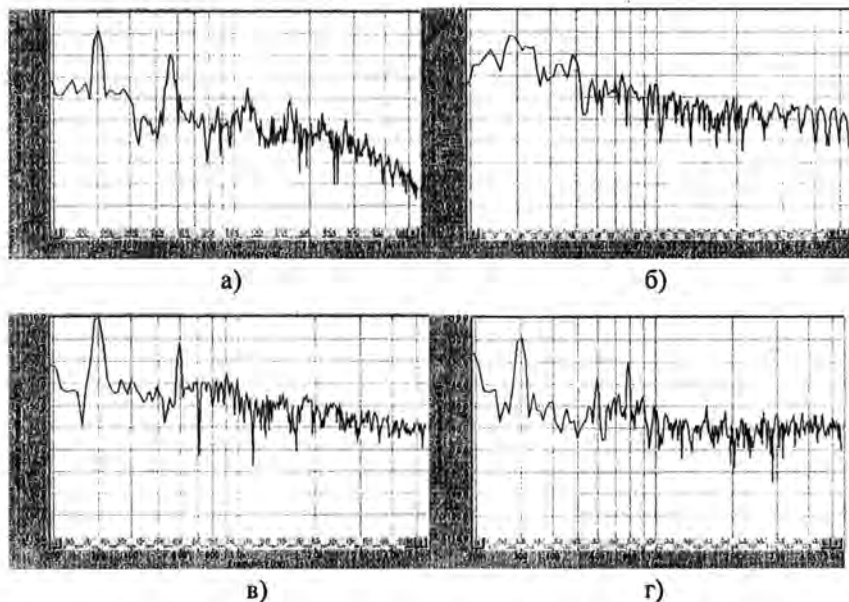


Рис. 2. Спектры токов двигателя модели МСП-0.25

Автоматизированная технология диагностики и управления парком ЭД основана на анализе частотного спектра рабочего тока двигателя. Дискретизация тока электродвигателя реализуется в блоке АЦП, получение спектральных характеристик тока ЭД реализовано с помощью БПФ. Входными данными модуля мониторинга электродвигателей является частотный спектр тока ЭД, рассчитанный в блоке БПФ. Для каждого электродвигателя формируется индивидуальная модель (ИМ), которая хранит спектральные характеристики исправного состояния двигателя.

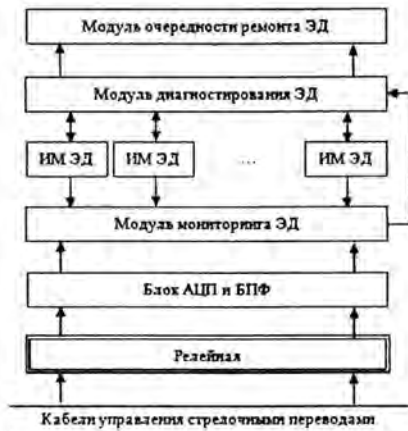


Рис. 3. Многоуровневая система управления эксплуатацией парка электродвигателей стрелочных переводов

Модуль мониторинга сравнивает спектр, полученный из блока БПФ, со спектром исправного состояния, прочитанного из соответствующей ИМ ЭД. При обнаружении существенных различий в этих спектрах модуль мониторинга передает спектральные характеристики анализируемого ЭД в модуль диагностирования. На выходе модуля диагностирования получаем оценки достоверностей выявляемых неисправностей электродвигателя. Эти оценки сохраняются в ИМ ЭД, формируя временной ряд, который используется для прогнозирования технического состояния электродвигателя. Текущее и прогнозируемое техническое состояние каждого ЭД из модуля диагностирования передается в модуль очередности ремонта электродвигателей, который дает рекомендации о порядке ремонта ЭД.

Разработанная АСУЭ парком ЭД производит измерения характеристик двигателя, находящегося под воздействием номинальных, рабочих значений напряжения, тока, магнитного поля и центробежных сил. Это позво-

ляет выявлять больше неисправностей, чем при использовании статических методов диагностики, и делает возможным замену электродвигателя до его полного выхода из строя. Разработанные модели диагностирования могут автоматически настраиваться для выявления новых видов неисправностей на основе анализа тока двигателей с эталонными неисправностями. Применение системы не требует высококвалифицированного инженера электромеханика как для настройки, так и для эксплуатации.

При управлении парком решается одна из основных подзадач эксплуатации ЭД железнодорожных стрелочных переводов – определение очередности ремонтов тех электродвигателей, при диагностике которых установлены различные скрытые типы неисправностей. Задача установления очередности ремонтов возникает при ограниченности ресурсов, к которым отнесены время ремонта, персонал, запасные части, денежные средства.

Для распознавания кластеров в спектральных характеристиках ЭД использована сеть Кохонена [5]. Выявление кластеров позволяет сопоставить с ними классы технического состояния электродвигателей и использовать SOFM сеть для классификации неисправностей. Анализ взаимного расположения кластеров на топологической карте позволяет выявлять сходства или различия между различными классами неисправностей. Использование сети Кохонена делает возможным выявление новых неисправностей, при этом их входные образцы будут размещены на топологической карте вне известных кластеров.

Входной слой сети Кохонена состоит из 256 элементов, на каждый из которых подаются величины интенсивности гармоник преобразования Фурье тока электродвигателя согласно (2). Выходной слой сети представляет собой топологическую карту. В результате многих экспериментов лучшую способность к кластеризации показала топологическая карта размерностью 3 на 5 элементов. Сеть SOFM отражает пространство входов размерностью 256 в двумерное пространство топологической карты. Радиус окрестности для нейрона победителя при обучении сети уменьшался линейно от 3 до 0. Топологическая карта для кластеризации спектральных характеристик электродвигателей представлена на рис. 4. На этой карте показаны приблизительные границы кластеров технического состояния двигателя. Знаки «+» обозначено положение входных образцов на карте, их близость к центрам нейронов и между собой. Кластеры обозначены следующим образом: исправен – 1, короткое замыкание обмотки – 2, короткое замыкание пластин коллектора – 3, обрыв секции якоря – 4, круговой огонь по коллектору – 5. Входные образцы, соответствующие исправному двигателю, хорошо локализованы, полностью соответствуют одному

нейрону топологической карты. Кластеры других типов неисправностей имеют небольшие перекрытия.



Рис. 4. Топологическая карта для кластеризации спектральных характеристик электродвигателей

Формирование базы правил экспертной системы

Далее представлен пример формирования конкретной базы правил (БП) ЭС для диагностики электродвигателей постоянного тока железнодо-рожных стрелочных приводов МСП 0.25. При составлении базы правил были исследованы образцы двигателей, имеющие различное техническое состояние: исправен, короткое замыкание обмотки, короткое замыкание пластин коллектора, обрыв секции якоря, круговой огонь по коллектору. Был получен частотный спектр токов этих образцов. Как выше отмечено, частотный спектр двигателя был представлен 256 интенсивностями гармоник быстрого преобразования Фурье.

Для формирования БП были исследованы средние арифметические значения интенсивностей гармоник различных образцов электродвигате-лей. Далее через $M(i; k)$ будет обозначаться среднее арифметическое ин-тенсивностей гармоник с индексами от i до k ($i < k$). На рис. 5 представлен один из характерных графиков значений $M(1; 64)$, полученных для раз-личных образцов двигателей. Диапазоны номеров образцов соответство-вали следующим классам технического состояния электродвигателей: [1; 56] – исправный, [57; 160] – короткое замыкание обмотки, [161; 211] – короткое замыкание пластин коллектора, [212; 283] – обрыв секции якоря, [284; 293] – круговой огонь по коллектору.

Анализ значений величины $M(1; 64)$, в конечном счете, позволил вы-делять среди множества образцов ЭД два класса электродвигателей: «ис-правный», «круговой огонь по коллектору» (см. рис. 2). Правила для диа-гностики образцов ЭД этих категорий имеют следующий вид:

IF ($M(1; 64) < 90$) THEN «Исправен»

IF ($M(1; 64) > 700$) THEN «Круговой огонь по коллектору»

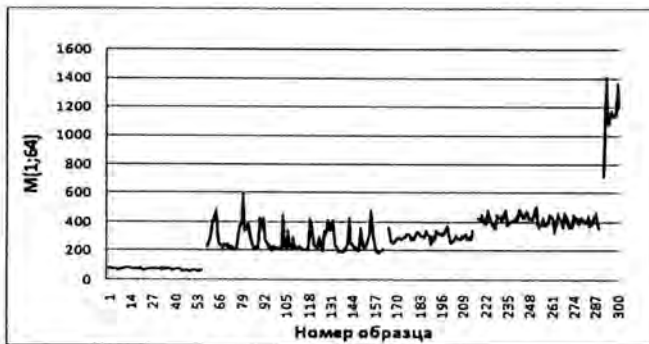


Рис. 5. Значения интенсивностей гармоник $M(1; 64)$ для различных образцов двигателей

Подобным образом выполненные исследования значений величины $M(26; 30)$ дали возможность диагностировать электродвигатели со следующими видами неисправностей: «короткое замыкание обмотки», «короткое замыкание пластин коллектора» и «обрыв секции якоря». Представленные в удобной для изложения форме правила экспертной системы для выявления этих видов неисправностей имеют следующий вид:

```
IF ( [  $M(26; 30) > 600$  ] AND [  $M(26; 30) < 1000$  ] )
    THEN «Короткое замыкание обмотки»
IF ( [  $M(26; 30) > 30$  ] AND [  $M(26; 30) < 200$  ] )
    THEN «Короткое замыкание пластин коллектора»
IF ( [  $M(26; 30) \geq 200$  ] AND [  $M(26; 30) < 430$  ] )
    THEN «Обрыв секции якоря»
```

Указанная методика автоматизированной диагностики состояний ЭД модели МСП 0.25 средствами экспертной системы оказалась достаточно эффективной. С учетом некоторых опущенных здесь несущественных деталей формирования БП представленная методика автоматизированной диагностики неисправностей ЭД позволила правильно определять все типы неисправностей для каждого из имеющихся вариантов данных.

Для определения очередности ремонта ЭД в работе предложен показатель и соответствующий критерий, который получил название «стоимость отказа электродвигателя». Оценка стоимости отказа электродвигателя C определяется в следующем виде:

$$C = f(R, F, Z), \quad (3)$$

где R – ожидаемая нормативная стоимость ремонта электродвигателя; F – прогнозируемая стоимость ремонта электродвигателя по ИМ; Z – издерж-

ки, вызванные задержкой поездов в случае отказа электродвигателя и прекращения работы стрелочного перевода. В линейной модели (3) оценка стоимости отказа ЭД представима как

$$C = \gamma_z Z + \gamma_R R + \gamma_F F, \quad (4)$$

где коэффициенты важности γ_k определяются на основе метода анализа иерархий [6].

Для оценки стоимости R используется значение вероятности неисправности некоторого вида d_i , которые считаются независимыми. С учетом этого оценка ожидаемой стоимости ремонта электродвигателя R представима следующим образом:

$$R = \sum_{i=1}^N d_i c_i, \quad (5)$$

где d_i – достоверность i -ой неисправности, $d_i \in [0;1]$; c_i – нормативная стоимость ремонта i -ой неисправности; N – число неисправностей, выявляемых системой диагностики электродвигателей.

В разработанной технологии управления кроме нормативных значений d_i используются их оценки, получаемые на основе ИД. Для выявления неисправностей в электродвигателях используются искусственные нейронные сети [5], при этом значение достоверности i -ой неисправности d_i определяется значением нейрона выходного слоя многослойного персептрона. Прогнозируемая стоимость ремонта электродвигателя F вычисляется как

$$F = \sum_{i=1}^N d_i^F c_i, \quad (6)$$

где d_i^F – прогнозируемое значение достоверности i -ой неисправности, $d_i^F \in [0;1]$. Методика автоматизированной системы эксплуатации парков ЭД основана на оценке значений достоверностей неисправностей, которые вычисляются системой диагностики электродвигателей на основе ИМ. Система диагностики осуществляет постоянный (по регламенту) контроль технического состояния ЭД, который реализуется без его извлечения из стрелочного привода (оценка «по текущему состоянию»). Мониторинг

технического состояния конкретного двигателя позволяет получить временной ряд оценок достоверностей для каждой i -ой неисправности d_i :

$$D_i = \{d_i^1, d_i^2, \dots, d_i^k, d_i^{k+1}, \dots, d_i^L\}, (i = \overline{1, N}). \quad (7)$$

При работе ЭД его детали стареют и изнашиваются, поэтому можно предположить, что с течением времени каждое последующее значение d_i^{k+1} достоверности i -ой неисправности временного ряда (7) будет не меньше предыдущего d_i^k : $d_i^k \leq d_i^{k+1}, (i = \overline{1, N})$.

Для вычисления оценок F (6) необходимо прогнозировать значение d_i^F на основе данных временного ряда (7), соответствующего i -ой неисправности в индивидуальной модели ЭД. Для расчета оценок значений d_i^F используются методы экстраполяции, параболическая экстраполяция.

Издержки Z , вызванные задержкой поездов в случае отказа электродвигателя и прекращения работы стрелочного перевода, оцениваются как

$$Z = N_p T_v C_2 P_2, \quad (8)$$

где N_p – среднее число поездов, проходящих через стрелочный перевод в час; T_v – время, необходимое для возобновления работы стрелочного перевода; C_2 – стоимость задержки одного поезда на один час; P_2 – вероятность отказа стрелочного перевода.

Если не учитываются взаимные влияния различных типов неисправностей ЭД, вероятность отказа стрелочного перевода P_2 может быть оценена на основании достоверностей неисправностей электродвигателя стрелочного перевода согласно $P_2 = \max_i (d_i)$.

Задача автоматизации управления процессом эксплуатации парка ЭД решена на основе формирования ИМ средствами двухуровневой нейронно-сетевой модели, средствами карт Кохонена. Мониторинг состояний ЭД и анализ их динамики реализуется в рамках ИМ. Одновременно с использованием модели парка контролируются состояния, соответствующие возникновению различных типов неисправностей. Исходное состояние ЭД принимается исправным (рис. 6, 7). На рис. 6 исправному состоянию соответствует кластер 5 ИМ; в кластере 4 техническое состояние ухудшается. Кластеры 1 и 2 ИМ соответствуют короткому замыканию обмотки. На

моделі парка ЕД (рис. 7) показан перехід двигателя з исправного стану (кластер 2) в стані короткого замикання обмотки (кластер 3).

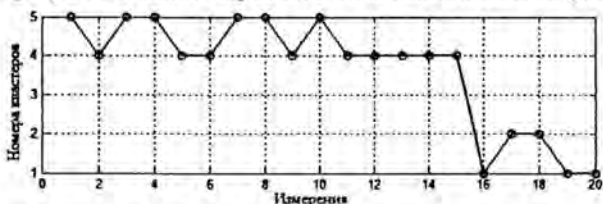


Рис. 6. Представление процесса эксплуатации ЭД как перемещения состояний по кластерам индивидуальных моделей

В целом автоматизированная технология и система эксплуатации парков электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов позволяет перейти от плановой, установленной нормативами замены двигателей с неиспользованными эксплуатационными ресурсами, к обслуживанию двигателей по их фактическому техническому состоянию.



Рис. 7. Пример перемещения состояний ЭД по кластерам во времени

Анализ полученных результатов и выводы. В работе представлены методы и средства, предназначенные для эффективного мониторинга и управления автоматизированными процессами эксплуатации парков элементов технических систем железнодорожного транспорта. Выполненные исследования и разработки позволяют перейти от планово-предупредительного метода эксплуатации к обслуживанию по фактическому техническому состоянию ЭД. При этом осуществляется прогнозирование технического состояния элементов средствами методов искусственного интеллекта. Эксплуатационные свойства разработанной системы:

- прогнозирование отказа ЭД на основе индивидуальных моделей;
- удаленная диагностика без исключения из процессов эксплуатации;
- самообучение и адаптация моделей объектов;
- простота эксплуатации;
- простота конфигурации для других типов электрических машин;

- применимость к другим элементам технических систем (дизельные тяговые двигатели локомотивов).

Технико-экономические показатели автоматизированной системы управления процессами эксплуатации парков объектов характеризуются следующим: повышение безопасности движения поездов; выявление неисправности за 6 месяцев до отказа двигателя; уменьшение количества задержек в движении поездов; восстановление двигателя с меньшими затратами за счет ранней диагностики; стоимость текущего или среднего ремонта в 4 – 6 раз дешевле нового электродвигателя; разработанная система за год выявляет 10 – 12 неисправных двигателей на каждые 100 эксплуатируемых.

Бібліографічні посилання

1. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с. : ил.
2. Саати Т. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 276 с.
3. Скалозуб В. В. Метод и информационные технологии нечетко-статистического управления / В. В. Скалозуб // Системні технології : Регіон. міжвуз. зб. наук. пр. – Вип. 1 (50). – Д., 2008. – С. 120 – 127.
4. Скалозуб В. В. Автоматизация мониторинга и управления эксплуатацией парка электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов на основе параметров текущего технического состояния / В. В. Скалозуб, О. М. Швец // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 60–64.
5. Скалозуб В. В. Нейросетевые модели диагностики электродвигателей постоянного тока / В. В. Скалозуб, О. М. Швец // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009, – № 4, – С. 7–11.
6. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Ф. Уоссерман. – М. : Мир, 1992. – 240 с.
7. Швец О. М. Классификация объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил / О. М. Швец // Системні технології : Регіон. міжвуз. зб. наук. пр. – Вип. 3 (68). – Д., 2010. – С. 133–139.

Надійшла до редколегії 14.07.2014.