

УДК 519.711.2

ИВЧЕНКО Ю. Н., к.т.н., доцент
ШВЕЦ О. М., ассистент,
СКАЛОЗУБ М. В., ассистент (ДНУЖТ)

Методы автоматизированного управления парком электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов «по текущему состоянию»

Представил д.т.н., профессор Скалозуб В. В.

Проблема автоматизированного управления техническими системами, парком электродвигателей «по текущему состоянию»

Проблема эффективной эксплуатации технических систем на основе оценки их текущего состояния, в том числе многочисленных ответственных систем железнодорожного транспорта, была и остается в центре внимания исследований и разработок [1, 3]. Решению задач в области создания соответствующих методов и автоматизированных систем, а также средств по обеспечению решения частных подзадач, ориентированных на конкретные объекты управления, посвящены многочисленные работы [2,4]. Отметим актуальность и сложность реализации даже частных задач эксплуатации «парков» технических систем «по текущему состоянию» (ЭТС), например таких, как мониторинг, диагностика состояний объектов, выбор характеристик и отображение состояний парка и других. В работе представлены результаты исследований по формированию системы математических моделей и соответствующих программно-технических средств, которые предназначены для обеспечения автоматизированной эксплуатации парка электродвигателей (ЭД) постоянного тока, которые широко используются в промышленности и на транспорте. В нашем случае это двигатели модели МСП 0,25 железнодорожных стрелочных приводов, эксплуатируемые на Приднепровской железной дороге.

В работе [4] был предложен метод и информационная технология автоматизированной диагностики электродвигателей постоянного тока как часть задачи управления парком ЭД по текущему состоянию, использующие модели искусственных нейронных сетей (ИНС). При этом было показано, что своевременная диагностика, обеспечивая выявление неисправностей

задолго до полного отказа двигателя, позволяет значительно сократить расходы на их эксплуатацию и ремонт, дает возможность повысить безопасность приводов. В основу информационной технологии диагностики парка ЭД железнодорожных стрелочных приводов положен мониторинг их технического состояния без извлечения из стрелочного привода. Это обусловлено тем, что кабели, питающие стрелочные двигатели, сводятся в релейную комнату диспетчерского пункта. Поэтому возможен постоянный контроль технического состояния всех стрелочных электродвигателей при снятии кривых тока электродвигателя. Преимущество системы автоматизированной диагностики [4] в том, что в ней производятся измерения характеристик двигателя, находящегося под воздействием номинальных, рабочих значений напряжений, токов, магнитных полей, центробежных сил и др. Такие измерения параметров ЭД позволяют выявлять больше неисправностей, чем при использовании статических методов диагностики [5].

Результаты [4] все же решают частную задачу и могут быть использованы как элемент автоматизированной системы ЭТС. Использование моделей диагностики на базе ИНС требует значительных наборов эталонных примеров, создания специальных процедур настройки и адаптации модели. В представленной работе получил развитие метод автоматизированной диагностики ЭД стрелочных переводов за счет использования моделей нечетких экспертных систем [1, 3]. Для реализации непосредственных процедур управления парком ЭД с учетом их технического состояния разработана двухуровневая система математических моделей, верхний уровень которой представляет некоторые контролируемые свойства парка технических систем в целом, а нижний – формируется из математических моделей отдельных объектов. Для реализации математических моделей каждого

© Ю. Н. Ивченко, О. М. Швец, М. В. Скалозуб, 2010

из уровней использованы нейро-сетевые методы в форме карт Кохонена [2]. Верхний уровень системы управления парком ЭД обеспечивает оценку его текущего состояния и прогнозирование значений параметров (ожидаемое время до проявления неисправности, необходимые затраты на восстановление и т.п.), а модели нижнего уровня представляют эволюцию состояний конкретных ЭД. Для реализации моделей управления парком объектов были разработаны и модифицированы процедуры библиотеки MATLAB [8].

Інформаційна база автоматизації процесів експлуатації парку електродвигателів на основі оцінки їх поточного стану

Для автоматизації процесів експлуатації парку ЕД в якості базових вибрані процедури моніторингу станів технічних систем, а також їх діагностики. Цілью процедур моніторингу являється збір оперативних даних про кожну технічну систему, що на практиці повинно виконуватися при снятій кривих току електродвигателів в релейній кімнаті. Отримані при цьому дані піддаються перетворенню і первинному аналізу, а потім передаються в інформаційні бази даних і використовуються для аналізу, моделювання, діагностики, а також рішення інших завдань експлуатації парку ЕД.

При діагностиці встановлювалися чотири класи технічного стану електродвигателя: справний, коротке замикання обмотки, коротке замикання пластин колектора, обрив секції якоря. Для отримання частотного спектра робочий ток електродвигателя перетворювався в форму імпульсно-кодової модуляції. При перетворенні аналогового сигналу використовувалася частота дискретизації рівна 11025 Гц, розрядність вибірки складала 16 біт. Частотний спектр току двигателя визначався за допомогою швидкого перетворення Фур'є [6]. Отримані послідовності дискретних значень записувалися в wav-файли, відповідні стандарту файлів uncompressed Microsoft PCM audio.

При формуванні навчальних даних використовувалися електродвигатели, що належать до всіх чотирьох класів несправностей. Причому технічний стан кожного двигателя встановлювався шляхом експертних оцінок [4]. Алгоритми виявлення несправностей в ЕД базуються на порівнянні спектра току діагностованого двигателя зі спектрами току еталонних двигателів.

Встановлено [4], що виникнення кожного виду несправності призводить до появи в спектрі току двигателя нових гармонік певної частоти та інтенсивності. Спектри токів двигателів для різних станів представлені на рис.1.

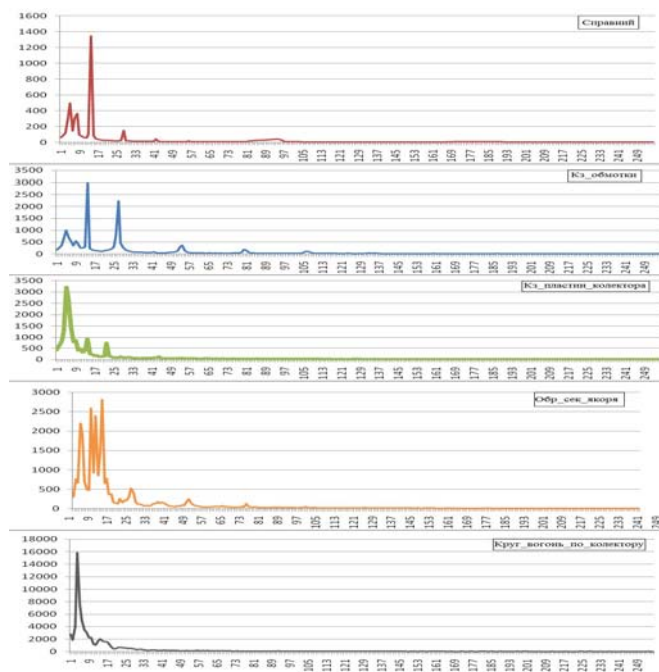


Рисунок 1 – Спектры токов эталонных электродвигателей (256 интенсивностей гармоник)

Для формування представителів параметрів спектрів були досліджені середні арифметичні

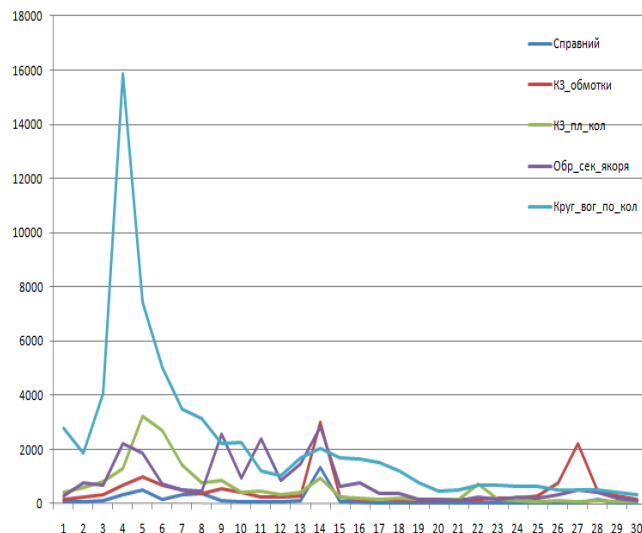


Рисунок 2 – Спектры токов эталонных электродвигателей для выделенного диапазона частот

значения интенсивностей гармоник различных образцов электродвигателей. Анализ показал, что достаточно рассматривать спектры токов двигателей лишь для 30 гармоник, дальнейшие гармоники не имеют особенностей поведения, которые позволяют отличить одно состояние ЭД от другого. Вид спектров тока с 30 гармониками для разных состояний приведены на рис. 2.

Диагностика электродвигателей методами экспертных систем

Для формирования баз правил (БП) экспертных систем были исследованы средние арифметические значения интенсивностей гармоник различных образцов электродвигателей. Далее через $M(i; q)$ обозначим среднее арифметическое интенсивности гармоник с индексами от i до $(i < q)$. На рис. 3 представлен один из характерных графиков значений $M(1; 64)$, полученных для различных образцов двигателей. Диапазоны номеров образцов соответствовали 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.

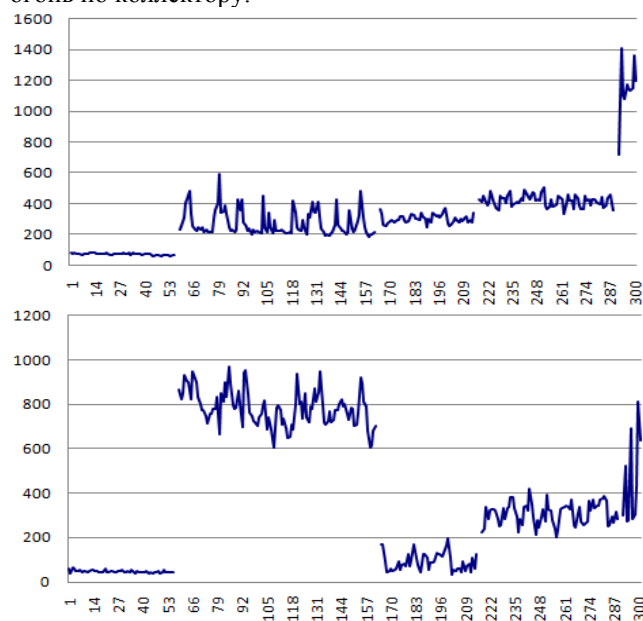


Рисунок 3 – Значения $M(1; 64)$ для различных образцов двигателей (а-сверху). Значения $M(26, 30)$ б-снизу)

Анализ значений $M(1; 64)$ позволил выделять среди набора образцов ЭД два класса электродвигателей: «исправный», «круговой огонь по коллектору» (рис. 3, а). Правила для диагностирования образцов ЭД этих категорий имеют следующий вид:

IF ($M(1; 64) < 90$) THEN «Исправен»;

IF ($M(1; 64) > 700$) THEN

«Круговой огонь по коллектору».

Так же выполненные исследования значений $M(26, 30)$ (см. рис.3, б) 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».

Приведенная методика автоматизированной диагностики состояний ЭД модели МСП 0.25 средствами экспертной системы, в целом, оказалась достаточно эффективной. Но предложенные правила частично «перекрываются», их формирование носит эвристический характер, не определен механизм относительно возможности усовершенствования БП, например, при получении новых образцов поврежденных двигателей либо при наличии у них нескольких неисправностей одновременно.

Развитие предложенного метода и автоматизированной системы диагностики электродвигателей выполняется за счет, в первую очередь, расширения экспериментальной базы – накопления сведений о неисправности устройств и соответствующих спектров рабочих токов двигателей. Далее, как теоретически, так и практически, важное значение имеет переход к нечетким базам правил, использующим методы нечеткого управления, в которых необходимо корректно формализовать условия типа « > 600 », « < 200 » и др. За счет этого достигается возможность расширения области применения экспертной системы диагностики, а также выявление одновременно нескольких видов повреждений в ЭД, которые имеют место с разной степенью достоверности.

Нечеткие модели диагностирования состояний электродвигателей

Эффективным методом относительно формализации причинно-следственных связей в задачах диагностики являются нечеткие отношения и композиционное правило вывода Заде [1, 3]. При по-

строении моделей изучаемых процессов существенным является то, что задачи диагностики состояний объекта могут быть сведены к решению нечетких логических уравнений, связывающих функции принадлежности причин (диагнозов) и последствий (симптомов). Следующим шагом по формированию общих моделей диагностирования является предложение в работах [1] метод, который заключается в замене задачи решения системы нечетких логических уравнений задачей оптимизации соответствующего функционала. Эта задача в общем случае относится к классу NP-сложных [2]. Для решения таких задач оптимизации используются генетические алгоритмы [3, 8]. В работе [2, 3] также предлагается адаптивный подход к проектированию системы диагностики. В ней строится и обучается специальная нейро-нечеткая сеть, которая является изоморфно логичным диагностическим уравнением.

Несмотря на довольно высокую сложность решения системы нечетких логических уравнений, представляющих задачи диагностирования ЭД, будем применять для них методы экспертных систем, использующих нечеткие и нечетко-статистические базы знаний [1, 3, 7]. Процедуры метода нечетко-статистического управления приведены в [7].

Для реализации предложенных в работе методов и процедур моделирования и управления применены средства системы MATLAB [8]. Ее компонент Fuzzy Logic Toolbox поддерживает все фазы разработки нечетких систем. Функции пакета реализуют нечеткий логический вывод, кластеризацию и адаптивное нейро-нечеткое настраивание (ANFIS). Система позволяет модифицировать исходный код, создавать собственные

моделирования отсутствуют такие, которые позволяют одновременно использовать различные категории неопределенности (статистическую, нечеткую др.). Особое внимание уделялось созданию адекватной системы нечетко-статистического и других форм вывода с многократной неопределенностью данных. Для этого были разработаны специализированные процедуры MATLAB. Библиотека специализированных функций является основой для разработки программ моделирования процедур диагностирования электрических двигателей на основе правил нечетких экспертных систем.

Реализацию нечетких процедур диагностирования электродвигателей демонстрируют следующие рисунки. Функция диагностирования состояния ЭД может принимать несколько значений, рис. 4: 1) KZobm – короткое замыкание обмотки, 2) KZkol – короткое замыкание пластин коллектора, 3) ObrYak – обрыв секции якоря.

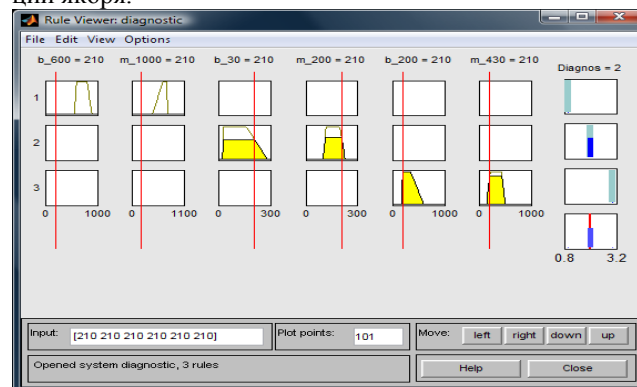


Рисунок 5 – Правила модифицированного вывода Такаги-Сугено

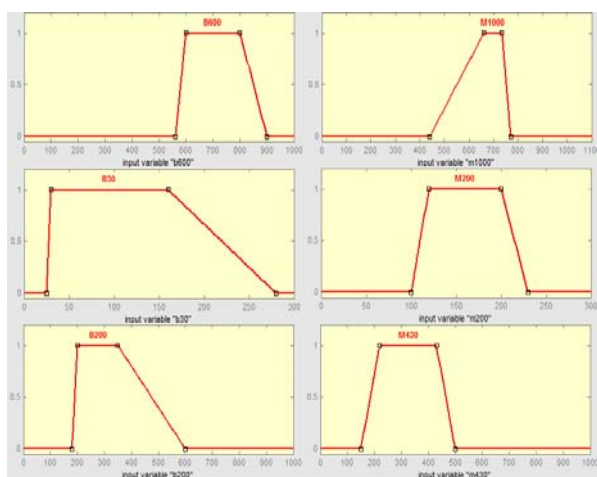


Рисунок 4 – Функции принадлежности входов системы диагностики, классы неисправностей электродвигателей

функции принадлежности или процедуры дефазификации. Последнее является главным поскольку среди существующих универсальных средств нечеткого

Рис. 5 показывает, что при входящем значении средней интенсивности «215», имеет место неисправность «Короткое замыкание пластин коллектора» со степенью достоверности 0.7. Заметим, что в детерминированном случае при выполнении правила

IF ([M(26; 30) >= 200] AND [M(26; 30) < 430])
THEN «Обрыв секции якоря»

результат диагностирования был бы другим. На рис. 5 видно, что такая возможность учтена и при методе нечеткого диагностирования, но с более низкой степенью достоверности. Результаты диагностирования зависят от моделей нечетких величин, рис. 8, которые в нашем случае представляют приближенные значения нечетких термов для величин интенсивности электрического тока M(26; 30): «Больше 30», «Меньше 200», «Больше = 200», «Меньше 430». За счет адаптации этих нечетких величин, в том числе на основе статистических данных [1, 3], обеспечивается совершенствование экспертной системы автоматизированного диагностирования, а также возможность исследования других типов ЭД

Двухуровневые нейронно-сетевые модели процессов эксплуатации парков двигателей железнодорожных стрелочных приводов

Цель состояла в автоматизации управления процессом эксплуатации парка ЭД с контролируемыми текущими состояниями на основе построения двухуровневой нейронно-сетевой модели (карты Кохонена [2]), в которой мониторинг состояний ЭД и анализа их динамики реализуется в рамках индивидуальной модели (ИМД) каждого двигателя. Одновременно с использованием общей модели парка (ОМП) контролируются соответствующие возможные перемещения, отражающие изменение состояний, соответствующих различным типам неисправностей. В качестве исходных используются эксплуатационные данные – гармоники определенной частоты и интенсивности в спектре тока для электродвигателей с ранее обнаруженными состояниями (образцовые) и для исследуемого электродвигателя.

Для решения задачи по эксплуатационным данным была построена ОМП возможных состояний электродвигателей в форме Карты Кохонена. При обучении (10000 эпох) использовались представители ЭД со следующими контролируемыми состояниями: – И (исправен): 25 двигателей (1-25); – КЗО (короткое замыкание обмотки): 20 двигателей (26-45); – КЗПК (короткое замыкание пластин коллектора): 15 двигателей (46-60); – ОСЯ (обрыв секции якоря): 30 двигателей (61-90); – КПК (круговой огонь по коллектору): 10 двигателей (91-100).

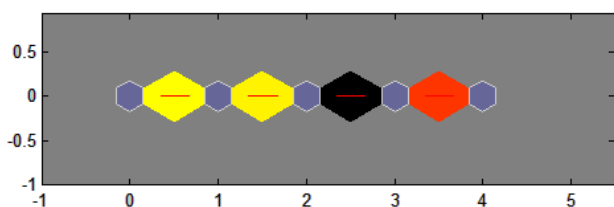


Рисунок 6 – Карта Кохонена общей модели парка ЭД по исследованию мощности связей между группами

В модели реализован механизм «раскраски» узлов в соответствии с заданными признаками объектов, которые исследуются при анализе совокупности данных. После раскрашивания получают зоны модели, которые соответствуют заданным цветным «признакам типа узлов». При анализе новых данных, или новых ЭД, попадание параметров некоторого объекта при классификации на основе карты Кохонена в определенную зону говорит о его ожидаемых свойствах. За счет построения модели статистических данных как карты признаков Кохонена, а также имея информацию о части исследуемых объектов, можно достаточно достоверно прогнозировать поведение других объектов [2].

На рис. 6 изображена карта Кохонена общей модели состояний электродвигателей. Малые шестиугольники – нейроны карты Кохонена, а цвет болевших – отображает близость групп объектов. Чем темнее цвет шестиугольника – тем сильнее отличаются кластеры объектов.

Рис. 7 демонстрирует пример распределения двигателей, показатели которых использовались для обучения карты Кохонена общей модели в кластерах.

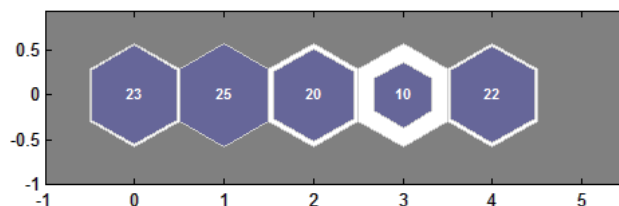


Рисунок 7 – Распределение эталонных двигателей в кластерах общей модели парка

Таблица 1 – Распределение элементов в кластерах общей модели состояний парка ЭД

№ кл.	Номера элементов								Название состояния	
1	46	47	48	49	50	51	52	КЗПК, КПК		
	53	54	55	56	57	58	59			
	60	91	93	94	95	96	97			
	99	100								
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Исправ- ный
	10	11	12	13	14	15	16			
	17	18	19	20	21	22	23			
	24	25								
3	26	27	28	29	30	31	32	КЗО		
	33	34	35	36	37	38	39			
	40	41	42	43	44	45				
4	64	65	66	67	74	75	76	ОСЯ		
	82	84	85							
5	61	62	63	68	69	70	71	ОСЯ, КПК		
	72	73	77	78	79	80	81			
	83	86	87	88	89	90	92			
	98									

Можно сделать вывод (табл. 1), что эталонные двигатели также несут в себе несколько потенциальных (или уже обнаруженных) неисправностей (состояний). Полностью различаются двигатели в исправном состоянии и те, что имеют короткое замыкание обмотки. Можно построить также карты Кохонена для отдельных электродвигателей, используя их эксплуатационные

данные (табл. 2). На рис. 8, рис. 9 приведены примеры моделей ЭД нижнего уровня, представляющих динамику изменения состояний устройств при эксплуатации.

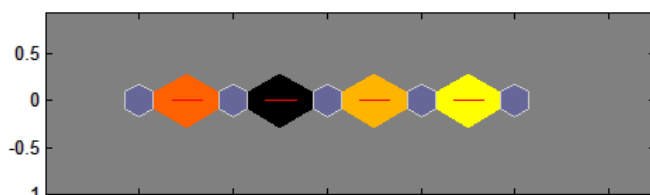


Рисунок 8 – Карта Кохонена мощности связей между кластерами ИМД

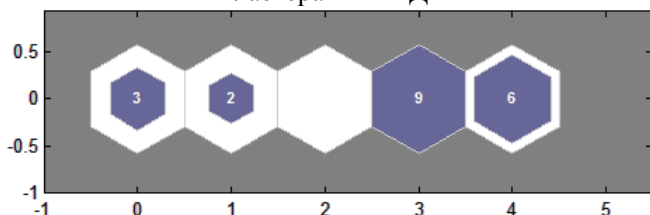


Рисунок 9 – Распределение измерений состояний двигателя в кластерах ИМ

В табл. 2 указаны данные, характеризующие распределение состояний ЭД в кластерах, согласно рис. 9.

Таблица 2 – Распределение элементов индивидуальной модели ЭД

№ кл. ИМ	Номера элементов	№ кл. ОМ
1	16 19 20	3
2	17 18	3
3	–	
4	2 5 6 9 11 12 13 14 15	2
5	1 3 4 7 8 10	2

Приведенные в табл. 2 данные показывают, что наблюдается динамика состояний электродвигателя: первые измерения (1-15) указывают на исправное состояние, последние (16-20) уже указывают на состояние «короткое замыкание обмотки».

Применяя разработанные функции библиотеки MATLAB, выполним анализ связи индивидуальной и общей моделей, совместно обеспечивающих процессы эксплуатации парка ЭД. Согласно табл. 3 исходное состояние некоторого рассматриваемого двигателя является исправным, но постепенно параметры состояния приближаются к короткому замыканию обмотки. Наилучший показатель исправности наблюдается в кластере 4 индивидуальной модели состояний, дальше он ухудшается в кластере 5 (увеличивается минимальное отклонение от кластера общей модели состояний, соответствующего исправному состоянию). Кластеры 1 и 2 индивидуальной модели уже соответствуют короткому замыканию обмотки.

Таблица 3 – Анализ кластеров ИМД по отношению к общей модели парка ЭД

№кл.ИМ	Отклонение	Мин. отклонение	№ кл.ОМ
1	1.6752 1.4667 0.7626 1.1863 1.7142	0.7626	3
2	1.3681 1.0484 0.6194 1.0211 1.3564	0.6194	3
3			
4	1.0170 0.2573 1.0024 1.0388 1.0002	0.2573	2
5	1.0039 0.3165 1.0353 1.0523 1.0086	0.3165	2

Таким образом, второй кластер индивидуальной модели ЭД является наиболее приближенным к состоянию короткого замыкания обмотки.

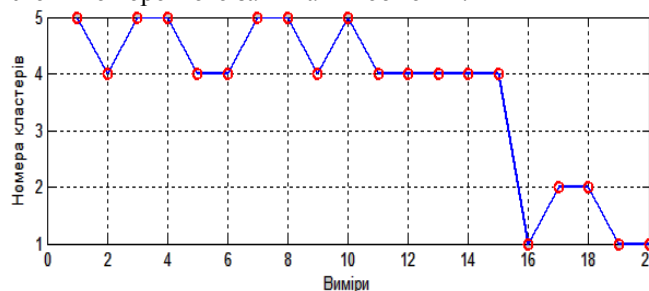


Рисунок 10 – Представление процесса эксплуатации ЭД как перемещения состояний по кластерам ИМД

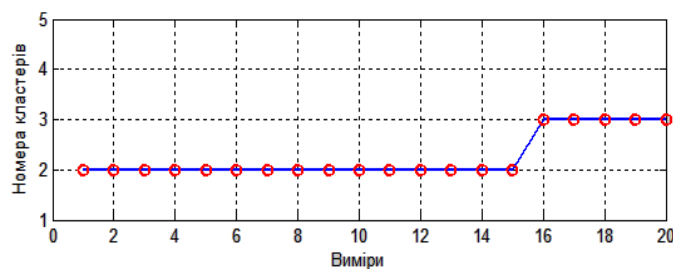


Рисунок 11 – Перемещение состояний ЭД по кластерам ОМП со временем

Рис. 10, рис. 11 отражают динамику изменения состояния исследуемого электродвигателя, а рис. 12 – представляет пример отображения динамики состояний парка ЭД, построенного с использованием разработанных дополнительных функций MATLAB.

Согласно рис. 12 в шестиугольниках карты Кохонена указано распределение двигателей на данный момент (23, 22, 23, 10, 22), сверху в прямоугольниках – предварительное распределение (23, 25, 20, 10, 22). В зависимости от числа элементов задается цвет шестиугольника. Если произошло изменение количества элементов в кластере – цвет зеленый, а если число элементов превышает некоторое заданное число (здесь

– 22) – цвет красный, иначе цвет является стандартным, синим.

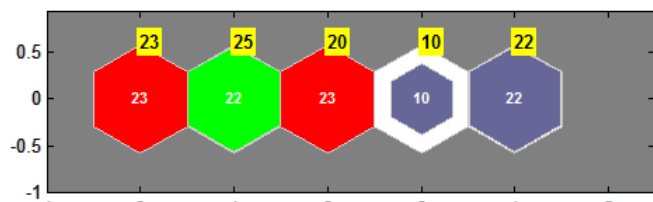


Рисунок 12 – Отображение динамики состояний парка электродвигателей стрелочных приводов

Такой анализ (рис. 12) позволяет эффективно осуществлять мониторинг состояния парка ЭД при его эксплуатации, своевременно устанавливая потребности в осуществлении ремонтов или обновлении парка технических систем.

Выводы

Разработаны методы и средства, предназначенные для автоматизации управления процессами эксплуатации парка электродвигателей стрелочных приводов по оценкам их текущего состояния. Для управления парком технических систем использована двухуровневая модель, сформированная с использованием карт Кохонена. В рамках системы также решается задача диагностики электродвигателей постоянного тока при их эксплуатации, которая реализуется методами экспертных систем. Автоматизированная система допускает адаптацию на основе обработки эксплуатационных данных.

Литература

1. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. – М.: Изд-во Машиностроение, 2004. – 378 с.
2. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006.
3. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.
4. Скалозуб В.В., Швец О.М. Нейросетевые модели диагностики электродвигателей постоянного тока // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – №4. – С. 7-11.
5. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв, сигналізації, централізації та блокування (СЦБ), Державна адміністрація залізничного транспорту

України, Київ, 1998.

6. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления свертки. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985.
7. Скалозуб В.В., Блохин Е.С. Автоматизированное нечетко-статистическое управление при моделировании расписания движения пассажирских поездов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – №4. – С.98-105.
8. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288с.

Резюме

Разработаны интеллектуальные методы и средства для автоматизации процессов эксплуатации множества электрических двигателей постоянного тока с учетом их текущего состояния

Розроблені інтелектуальні методи і засоби, призначені для автоматизації процесів експлуатації множини електричних двигунів постійного струму, які ураховують поточний стан систем

Intellectual methods and the means intended for automation of operation processes of direct current electric motors are developed with reference to their current state

Ключові слова: диагностика электродвигателей, нечеткие модели диагностирования, сетевые нейронные модели

Поступила 27.06.2010 г.