

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА МЕТОДАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

В работе предложены методы мониторинга и управления автоматизированными процессами эксплуатации парков технических систем. Разработанные методы используют средства искусственного интеллекта и позволяют определять и прогнозировать техническое состояние элементов систем.

Повышение эффективности эксплуатации парков сложных технолого-экономических систем или их компонентов

Совершенствование процессов эксплуатации парков элементов технических систем является одной из основных задач железнодорожного транспорта. Задача повышения эффективности эксплуатации парков технолого-экономических систем или их компонентов формулируется следующим образом.

Дан парк элементов (объектов) технических систем. Техническое состояние объекта определяется посредством снимаемого с него сигнала. Дано множество эталонных объектов, техническое состояние которых известно. Также даны ресурсы, необходимые или же выделенные для эксплуатации объектов.

Для решения задачи повышения эффективности эксплуатации парков объектов требуется определить текущее техническое состояние компонентов системы (мониторинг технического состояния). Результатом мониторинга 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 техническое состояние элементов системы и установить рациональную очередность восстановления элементов в случае ограниченных ресурсов.

Решение задачи повышения эффективности эксплуатации парков технолого-экономических систем позволит реализовать своевременное определение технического состояния элементов системы, что приведет к повышению безопасности технической системы. Своевременная диагностика позволит снизить издержки, вызванные простоем элементов системы и уменьшить затраты на их восстановление. Прогнозирование технического состояния объектов позволит реализовать планирование процессов эксплуатации «по текущему состоянию».

Диагностирование состояний сложных систем средствами нечетко-статистических экспертных систем

В работе [1] представлена экспертная система (ЭС) классификации объектов по данным их частотного спектра. Основой ЭС является база нечетко-статистических правил (БНСП) [2] и метод нечеткого управления [3]. Нечеткая компонента БНСП отражает субъективные знания эксперта о частотном спектре объектов. Статистическая состав-

¹ Швец О.М. – к.т.н., старший преподаватель, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (г. Днепропетровск, Украина)

ляющая 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.

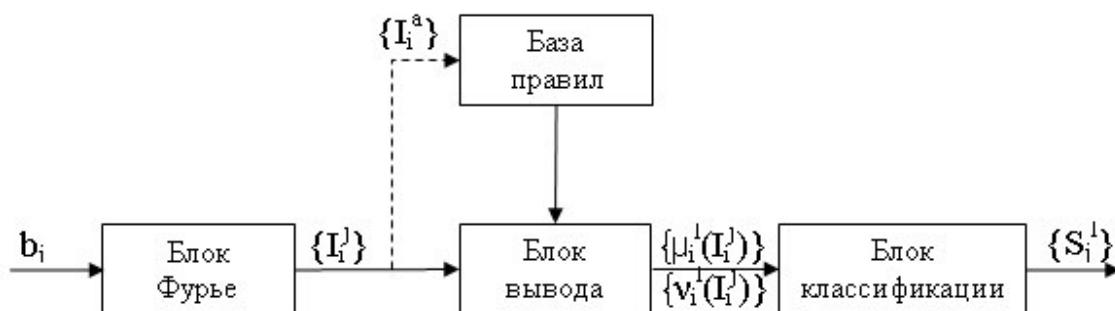


Рис. 1. Структура экспертной системы классификации объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил

Снятый с объекта сигнал подается на АЦП для дискретизации. Частотный спектр сигнала объекта получается посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ). 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 $(\text{Re}_i, \text{Im}_i), i = \overline{1, N_H}$. Для каждой гармоники преобразования Фурье вычисляется интенсивность частоты I_i согласно

$$I_i = \sqrt{\text{Re}_i^2 + \text{Im}_i^2}, i = \overline{1, N_H}. \quad (1)$$

Для построения базы правил ЭС был использован метод нечеткого управления Такаги-Сугено [3] и метод нечетко-статистического управления (НСУ) [2]. 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_i существует свое правило, определяющее степень принадлежности объекта b_j к классу c_i . Правила представлены в следующем виде:

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

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 (ЭД). Проводилась диагностика ЭД постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов моделей ДП 0.18, ДП 0.25, МСП 0.15 и МСП 0.25.

Пример реализации 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 планово-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. 2 [4]. Здесь показано, что кабели, питающие стрелочные двигатели, сводятся в релейную, где происходит снятие кривой тока электродвигателей, что позволяет реализовать постоянный контроль технического состояния всех стрелочных электродвигателей на станции без исключения ЭД из процесса эксплуатации.

Автоматизированная технология диагностики и управления парком ЭД основана на анализе частотного спектра рабочего тока двигателя. Дискретизация тока электродвигателя реализуется в блоке аналого-цифрового преобразователя (АЦП), получение спектральных характеристик тока ЭД реализовано с помощью быстрого преобразования Фурье (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. 2. 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 спрогнозированное техническое состояние каждого ЭД из модуля диагностирования передается в модуль очередности ремонта электродвигателей, который рассчитывает рекомендации о порядке ремонта ЭД.

Разработанная АСУЭ ПЭД производит измерения характеристик двигателя, находящегося под воздействием номинальных, рабочих значений напряжения, тока, магнитного поля и центробежных сил. Это позволяет 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 и др.

В работе для определения очередности ремонта ЭД 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 – стоимость ремонта электродвигателя;

F – прогнозируемая стоимость ремонта электродвигателя;

Z – издержки, вызванные задержкой поездов в случае отказа электродвигателя и прекращения работы стрелочного перевода.

В простейшем случае оценка стоимости отказа ЭД железнодорожного стрелочного перевода представима, как

$$C = Z + \frac{1}{2}(R + F). \quad (4)$$

Когда в качестве d_i используется значение вероятности неисправности некоторого вида, которые считаются независимыми, то 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 – стоимость ремонта i -ой неисправности;

N – число неисправностей, выявляемых системой диагностики электродвигателей.

В разработанной информационной технологии автоматизированной эксплуатации парка ЭД значение достоверности i -ой неисправности d_i вычисляется системой диагностики электродвигателей по текущему состоянию ЭД. В частности, если для выявления неисправностей в электродвигателях используются искусственные нейронные сети [5], то значение достоверности i -ой неисправности d_i определяется значением нейрона выходного слоя многослойного персептрона. Для выявления неисправностей в электродвигателях также может быть использована экспертная система классификации объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил.

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 эксплуатации парков ЭД железнодорожных СП основана на анализе значений достоверностей неисправностей, которые вычисляются системой диагностики электродвигателей. Система диагностики осуществляет постоянный контроль технического состояния электродвигателей. Этот контроль в нашем случае реализуется следующим образом: оценка текущего технического состояния ЭД происходит без его извлечения из стрелочного привода (оценка «по текущему состоянию»). Подобный мониторинг технического состояния ЭД реализуется путем периодического поиска неисправностей в электродвигателях. 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 электродвигателя 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 : $d_i^k \leq d_i^{k+1}, (i = \overline{1, N})$.

При вычислении прогнозируемой стоимости ремонта электродвигателя F (6) необходимо для каждой достоверности i -ой неисправности спрогнозировать значение d_i^F на основе данных временного ряда (7), соответствующего i -ой неисправности.

Для нахождения оценок спрогнозированных значений d_i^F можно воспользоваться классическими методами экстраполяции, в простейшем случае в работе использована параболическая экстраполяция.

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

$$Z = N_p T_v C_z P_z, \quad (8)$$

где N_p – среднее число поездов, проходящих через стрелочный перевод в час;

T_v – время, необходимое для возобновления работы стрелочного перевода;

C_z – стоимость задержки одного поезда на один час;

P_z – вероятность отказа стрелочного перевода.

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

В целом технология 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.

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-предупредительной замены элементов систем к обслуживанию по их фактическому техническому состоянию. При этом осуществляется прогнозирование технического состояния элементов средствами методов искусственного интеллекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шве́ц О. М. Классификация объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил / О. М. Шве́ц // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (68). – Дніпропетровськ, 2010. – С. 133–139.
2. Скалозуб В. В. Метод и информационные технологии нечетко-статистического управления / В. В. Скалозуб // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 1 (50). – Дніпропетровськ, 2008. – С. 120 – 127.
3. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с. : ил.
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. Шве́ц // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. 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. Шве́ц // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – № 4. – С. 7–11.

O.M. Shvets

MONITORING AND MANAGEMENT IMPROVEMENT OF AUTOMATED EXPLOITATION PROCESSES OF THE RAIL TRANSPORT BY MEANS OF INTELLIGENT SYSTEMS

In this paper, monitoring and management methods for automated exploitation processes of the rail transport are proposed. The methods use artificial intelligence and make it possible to define and predict the state of the elements of the technical system.

O.M. Shvets – The Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, senior lecturer, Ph.D.