

УДК 656.2.001.2:004

В. В. СКАЛОЗУБ, доктор технических наук, В. Н. ОСОВИК, аспирант, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДИИТ), Украина

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ НЕЧЕТКОЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ПАРКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ

Представлены результаты по созданию интеллектуальной автоматизированной системы управления эксплуатацией парков (ИАСЭП) железнодорожных технических систем (электродвигателей стрелочных переводов, ЭД) в условиях неопределенности (нечеткого типа) на основе параметров текущего состояния. Исследования проведены с использованием процедур мониторинга и диагностики ЭД (ГП 0.25, МСП 0.15 др.), находящихся под воздействием рабочих нагрузок. Управление эксплуатацией ЭД ведется на основе их индивидуальных моделей, а также сетей Кохонена, построенных по спектральным характеристикам токов ЭД. Разработан ряд моделей совершенствования ИАСЭП: планирование диагностики и ремонтов с учетом специализации исполнителей методами нечеткого математического программирования; эксплуатация парков ЭД на основе нечеткой двухэтапной модели планирования; использование модели векторной оптимизации с аксиоматическими свойствами компромисса показателей. Разработки обеспечивают переход от нормативного метода к обслуживанию технических систем на основе параметров текущего состояния.

**Введение.** Обеспечение технологической и экономической эффективности процессов (перевозок, эксплуатации, ремонта, автоматизированного управления и др.) является одной из первоочередных задач железнодорожного транспорта Украины, которая имеет многочисленные составляющие. В работе исследуются вопросы совершенствования автоматизированной эксплуатации парков (ИАСЭП) сложных технических систем (ТС) железнодорожного транспорта (вагонов, локомотивов, стрелочных переводов, здесь – электродвигателей, и др.) или их компонентов [1, 2]. В качестве объектов анализа и управления выступают электродвигатели (ЭД), используемые в железнодорожных стрелочных переводах [1]. В настоящее время эксплуатация ЭД осуществляется на основе планово-предупредительного метода с учетом нормирования. При этом данные о параметрах ЭД не систематизируются и обобщаются, не используются при планировании, автоматизация процессов эксплуатации – недостаточна. Как самостоятельный объект управления (технического и экономического) «парк» ТС в системах автоматизации представлен в ограниченном виде. Далее представлены результаты исследований по созданию элементов интеллектуальной автоматизированной системы управления процессами эксплуатации парков ЭД на основе получения оценок параметров их текущего состояния.

**Постановка задач исследования.** Задача управления «парком» ТС заключается в следующем. Рассматривается множество ТС одинакового (подобного) назначения, а также процессы их эксплуатации. Техническое состояние объектов на данном этапе эксплуатации определяется по сигналам, которые снимаются с него, причем без исключения систем из процессов эксплуатации. Также известны ресурсы (технические, материальные и др.), выделенные для эксплуатации «парка». Решается задача автоматизации процессов эксплуатации парка объектов на основе создания интеллектуальной автоматизированной технологии и системы управления процессами эксплуатации парка ТС по текущему состоянию. Необходимо определить параметры

состояния ТС (мониторинг состояния), а также обеспечить раннее выявление скрытых неисправностей (диагностика). На основе полученных данных нужно построить прогноз возможных изменений состояний элементов ТС, а также установить рациональную очередность контроля и восстановления элементов. Необходимо распределить работы по обслуживанию ТС между исполнителями, учитывая условия неопределенности (нечеткость [2]), прогноза параметров состояния и внешних факторов и др.

**Автоматизированная технология диагностики и управления парком.** Средства автоматизации основаны на анализе частотного спектра рабочего тока двигателя (рисунок 1).

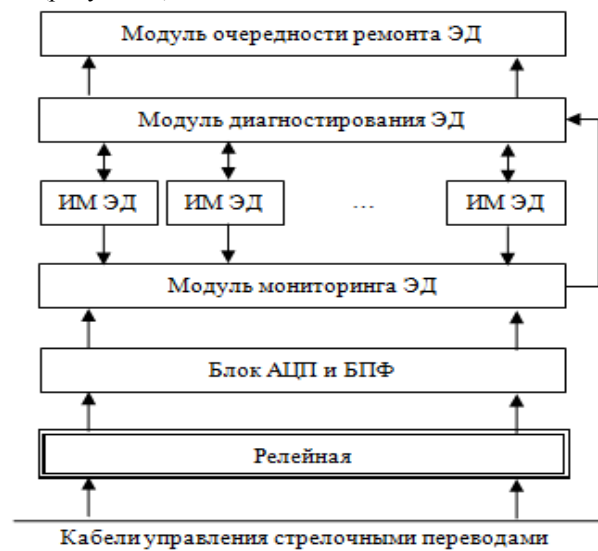


Рисунок 1 – Многоуровневая система управления эксплуатацией парка ЭД стрелочных переводов

Получение спектральных характеристик тока ЭД реализовано с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для каждого электродвигателя формируется индивидуальная интеллектуальная модель (ИМ), сохраняющая текущие характеристики исправного состояния двигателя. При диагностировании и их сопоставлении

получают оценки достоверности выявленных неисправностей электродвигателя. Эти оценки хранятся в ИМ процессов эксплуатации ЭД.

Для распознавания возможных неисправностей ЭД использована нейронная сеть Кохонена [2]. Анализ взаимного расположения кластеров на топологической карте Кохонена позволяет выявлять сходства или различия между различными классами неисправностей. Использование сети Кохонена и ИМ позволяет выявлять и новые виды неисправности ЭД [1, 2]. Текущее и прогнозируемое техническое состояние каждого ЭД используют для рекомендаций очередности ремонта. Применение в ИАСЭП процедур адаптации параметров ИМ, а также модели парка на основе данных диагностики и нейронных сетей, позволяет повысить эффективность и надежность железнодорожной инфраструктуры.

**Планирование процессов эксплуатации с учетом специализации исполнителей методами нечеткого математического программирования.** Планирование ремонтов (диагностирования, обслуживания и др.) объектов парка ЭД, с учетом распределения работ на основе специализации исполнителей, выполняется с помощью модифицированной открытой модели транспортной задачи о «целераспределении» [3] с ограниченными пропускными способностями. Отличительная особенность разработанной модели состоит в том, что в ней коэффициенты матрицы удельных стоимостей заранее не могут быть точно вычислены, а представимы нечеткими величинами. Модель планирования работ, представленная в форме нечеткого программирования (НМП) [2], имеет вид

$$R(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \widehat{C}_{ij} X_{ij} \rightarrow \max; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} \leq N_j, (j = \overline{1, n}); \sum_{j=1}^n X_{ij} \leq \widehat{d}_i^{(t)}, (i = \overline{1, m}); \quad (2)$$

$$X_{ij} \leq \widehat{d}_{ij}, (i = \overline{1, m}); X_{ij} \geq 0, (i = \overline{1, m}); (j = \overline{1, n}), \quad (3)$$

где  $X_{ij}$  – число заявок (ЭД) типа « $i$ », которые обслуживает специализированная система типа « $j$ »;  $\widehat{C}_{ij}$  – матрица нечетких оценок удельной эффективности обслуживания;  $\widehat{d}_{ij}^{(t)}$  – нечеткое число заявок типа « $i$ » в период « $t$ ». Реализация (1)–(3) сводится к решению последовательности задач линейного программирования (ЛП) за счет введения дискретных  $\alpha$ -уровней для нечетких величин [1, 2].

Для каждого  $\alpha$ -уровня выбираются границы в соответствии с правилами интервальной арифметики [2]. Если  $X_0$  – решение задачи ЛП на множестве уровня  $\alpha$ , то число  $\alpha$  считают его степенью принадлежности нечеткому множеству решений задачи (1)–(3). Перебрав значения уровней  $\alpha$ , получают функцию принадлежности, которая используется в моделях нечеткого управления [2].

**Управление эксплуатацией парков на основе нечеткой двухэтапной модели планирования.** При управлении процессами эксплуатации парков ТС необходимо учитывать условия неопределенности (стати-

стической, нечеткой и т.п.) значений параметров систем, состояний процесса перевозок, возможных схем возникновения сбоев и др. В таких моделях планирования при неопределенности используют соответствующую дополнительную информацию. Для учета различных недетерминированных вариантов реализации процессов используют двухэтапную модель оптимального планирования (ДМОП) [3], здесь – нечеткого, НДМОП, для расчета очередности диагностики (ремонтов) ЭД стрелочных переводов.

При формализации задачи НДМОП определяется априорная информация –  $Sh_k(V_k, H_k, \mu_k)$ , как варианты сценариев отказов  $V_k$  процесса перевозок (возможные отклонения графика движения др.). Для них описывают значения характерных параметров условий нечеткости  $\mu$ , а также оценивают дополнительные затраты на компенсацию возмущений (как детерминированные  $H_k$  или нечеткие  $\widehat{H}_k$ -функции) и нечеткими показателями возможности их возникновения  $\mu_k$ . Считают заданными функции детерминированные  $F(X)$  или нечеткие  $\widehat{F}(X)$  по оценке эффективности планов  $X(Sh_k(V_k, H_k, \mu_k))$  обслуживания парка ЭД –  $\widehat{F}(X)$ . Требуется определить оптимальный вектор  $X^*(X_{kj}^*)$  последовательностей обслуживания, применяя НДМОП.

Определим состояния  $\mu_i$  как детерминированные  $[d_i^1, d_i^2]$  или нечеткие  $[\widehat{d}_i^1, \widehat{d}_i^2]$  диапазоны значений возможных отклонения графика движения (задержек прибытия / отправления поездов):

$$\begin{aligned} \mu_i &= \langle [\mu_i^1, \mu_i^2], h_i(\mu_i), \mu(\mu_i) \rangle; \\ \mu_i &= \langle [\widehat{\mu}_i^1, \widehat{\mu}_i^2], \widehat{h}_i(\mu_i), \mu(\mu_i) \rangle, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $h_i(\mu_i)$ ,  $\widehat{h}_i(\mu_i)$  – удельные оценки (детерминированные или нечеткие) дополнительных затрат на корректировку графика в условиях  $\mu_i$ . Представим НДМОП планирования векторов  $X(X_{kj})$  в виде

$$\{\Phi(X) = \widehat{B}(X) + \widehat{E}[\widehat{f}(X, Y(X, \mu), \mu)]\} \Rightarrow \min_{X \in G_X}. \quad (5)$$

В (5) обозначено: детерминированная  $B(X)$  или нечеткая функция  $\widehat{B}(X)$  – стоимостная оценка вектора  $X_{kj}$  при выполнении графика движения;  $\widehat{f}_h(*)$  – функция дополнительных затрат на корректировку для условий  $\mu$ ,  $Y(X^{(t)}, \mu)$ ;  $\widehat{E}[*]$  – знак операции нечеткого вывода для величин  $\widehat{f}_h(*)$ ;  $G_X$  – область допустимых значений на этапе  $t$ ,  $X^{(t)}$ .

Для реализации (5) используют процедуры арифметики нечетких треугольных чисел [2]. Считают, что все нечеткие величины (4), (5), то есть  $\widehat{B}(X)$ ,  $\widehat{f}_h(*)$ ,  $\mu(\mu_i)$ , имеют форму векторов из трех значений –  $(\alpha_w, \alpha_w, \beta_w)$  и являются соответственно центрами, левыми и правыми

коэффициентами нечеткости. В рамках арифметики нечетких треугольных чисел расчет оценок  $\Phi(X)$  схематично можно представить в виде

$$X \rightarrow \{\hat{f}_k(X)\}, \hat{B}(X) \rightarrow \{f_k^n(X) = \hat{f}_k(X) \otimes \mu(\mu_k)\} \rightarrow \Phi(X) = \hat{B}(X) \oplus \hat{E}[f_k^n(X)].$$

Эта последовательность этапов дает обобщенный алгоритм расчета оценок нечеткого управления. В ней знаки  $\{\otimes, \oplus\}$  представляют соответственно операции произведения и суммы в рамках названной арифметики. Полученные при этом значения  $\Phi(X)$  далее используются в процедурах НДМОП для нахождения  $X^* (X_{ij}^*)$  в условиях нечеткой неопределенности процедур планирования.

**Векторная модель по управлению процессами эксплуатации парками ТС.** В ИАСЭП управление парком ТС представлено как решение задачи векторной оптимизации (ЗВО) с частными показателями:  $E$  – эксплуатационные затраты,  $P$  – уровень надежности системы,  $DZ$  – дополнительные затраты при отказах. Для реализации ЗВО используется аксиоматический метод скаляризации [4]. Метод состоит в выборе обобщенного минимаксного критерия оптимальности вида

$$\lambda^0 = \max_{x \in D} \min_{k \in N} \left\{ \lambda_k^1 = \frac{\lambda_k}{\alpha_k} = \frac{1}{\alpha_k} \frac{f_k^+(x) - f_k^-(x)}{f_k^+ - f_k^-} \right\}, \quad (6)$$

который обеспечивает получение единственного решения, удовлетворяющего свойствам оптимальности по Парето и симметрии:

$$\lambda_p(x_c^0) \alpha_p^{-1} = \lambda_q(x_c^0) \alpha_q^{-1}, \quad \forall p, q \in N, \quad (7)$$

где  $f_k^-, f_k^+$  – минимальные и максимальные оценки в  $x \in D_x$ ;  $\alpha_k$  – коэффициент важности. Выполнение условий (7) решения  $x_c^0$  (6) обеспечивается свойствами

Получено 25.05.2015

**V. V. Skalozub, V. N. Osovik.** Automated fuzzy intelligent control parks of railway operating systems based on technical parameters of current state.

It is improved methods and means of automation and intelligent control at the operation of the electric motors park rail turnouts under uncertainty (fuzzy). The models of vector optimization of management processes, fuzzy two-stage model of planning priority diagnostics and repair of electric motors, fuzzy distribution model works with the specialization of production is developed. Operation management of the park is based on their individual models and Kohonen network, built on the spectral characteristics of the motor currents. They allow to transfer from planned maintenance method of operation to electric motors operation for the actual current state. Methods and means of automation allow to use the of automation systems for the operation of the parks other technical rail transport systems.

взаимной противоречивости частных показателей ( $E, P, DZ$ ), что устанавливается логически [4] и служит основанием для выбора модели компромисса (6) для управления эксплуатацией парков.

**Выводы.** Усовершенствованы методы и средства автоматизации и интеллектуального управления процессами эксплуатации парка ЭД железнодорожных стрелочных переводов в условиях неопределенности (нечеткости). Разработаны модели векторной оптимизации процессов управления, нечеткие двухэтапные модели планирования очередности диагностики и ремонта электродвигателей, нечеткие модели распределения работ с учетом специализации производств. Управление эксплуатацией парка ведется на основе их индивидуальных моделей, а также сетей Кохонена, построенных по спектральным характеристикам токов электродвигателей. Они позволяют перейти от планово-предупредительного метода эксплуатации к обслуживанию электродвигателей по фактическому техническому состоянию. Методы и средства автоматизации дают возможность применения автоматизированной системы для эксплуатации парков других технических систем железнодорожного транспорта.

#### Список литературы

- 1 Скалозуб, В. В. Индивидуальные интеллектуальные модели для эксплуатации парка однородных железнодорожных технических систем на основе параметров текущего состояния / В. В. Скалозуб, В. Н. Осовик // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2014. – № 6. – С. 8–12.
- 2 Яхьяева, Г. Э. Нечеткие множества и нейронные сети [Текст] / Г. Э. Яхьяева. – М. : Интернет-университет информационных технологий ; Лаборатория знаний, БИНОМ, 2008. – 316 с.
- 3 Математические методы исследования операций [Текст] / под ред. Ю. М. Ермольева. – Киев, 1979. – 302 с.
- 4 Скалозуб, В. В. Аксиоматика компромисса в обратных задачах многокритериальной оптимизации конструкций и технических систем // Математические методы в задачах расчета и проектирования сложных механических систем : сб. науч. тр. АН Украины. – Киев : Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова. – 1992. – С. 62–65.