

## АВТОМАТИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ПАРКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕКУЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Разработана технология эксплуатации парков электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов с использованием нечетко-статистических экспертных систем. Технология включает мониторинг и диагностику текущего технического состояния двигателей без исключения из привода, позволяет определить очередность ремонтов двигателей.

*Ключевые слова:* парк электродвигателей, мониторинг, диагностирование, нечетко-статистические экспертные системы, эксплуатация по текущему состоянию

### Введение

Одним из основных требований к железнодорожным перевозкам является обеспечение их безопасности. При этом ответственными системами являются стрелочные переводы с электродвигателями (ЭД) постоянного тока, которых в Укрзалізнице (УЗ) имеется свыше 30 тыс., из них на Приднепровской железной дороге – 8 тыс. В связи с этим задача обеспечения работоспособности, а также сокращения расходов на эксплуатацию и ремонт парков ЭД, является актуальной.

Электродвигатели постоянного тока широко используются в промышленности и на железнодорожном транспорте, где в настоящее время обслуживание и ремонт ЭД стрелочных переводов выполняется по планово-предупредительному методу. При этом предполагается исключение ЭД из эксплуатации, что требует значительных материальных и временных ресурсов. Ремонт и замена стрелочных приводов происходит согласно принятым в УЗ 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 ЭД с учетом текущего технического состояния [1]. Для автоматизированного решения этой задачи необходимо разработать эффективную технологию, соответствующие модели и методы, а также создать программно-технические средства для эксплуатации парков ЭД, которые обеспечивают своевременную оценку фактического состояния двигателей, а в случае исчерпания технических ресурсов указывают на необходимость их замены, или же позволяют определить очередность ремонтов

ЭД в условиях ограниченных временных и других ресурсов [2].

Своевременная диагностика двигателей позволяет значительно сократить расходы на их эксплуатацию и ремонт. Выявление в условиях эксплуатации неисправности задолго до полного отказа ЭД дает возможность повысить безопасность и снизить издержки, вызванные простоем и обслуживанием соответствующих приводов. В статье разработан метод и информационная технология автоматизированного мониторинга и диагностирования парка ЭД железнодорожных стрелочных приводов без их исключения из эксплуатации. Технология основана на формировании средствами интеллектуальных систем индивидуальных моделей процессов эксплуатации ЭД стрелочных переводов. Она позволяет выявлять больше неисправностей, чем применяемые в УЗ методы диагностирования, а также дает возможность определять скрытые неисправности двигателя задолго до его отказа.

Разработка современных методов и средств, обеспечивающих возможность эксплуатации парков ЭД на основе параметров их текущего состояния, является актуальной для железных дорог Украины.

### Многоуровневая система моделей для управления эксплуатацией парка электро- двигателей стрелочных переводов на основе параметров текущего состояния

Общая схема разработанной автоматизированной системы управления эксплуатацией (АСУЭ) парка электродвигателей (ПЭД) представлена на рис. 1. 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.

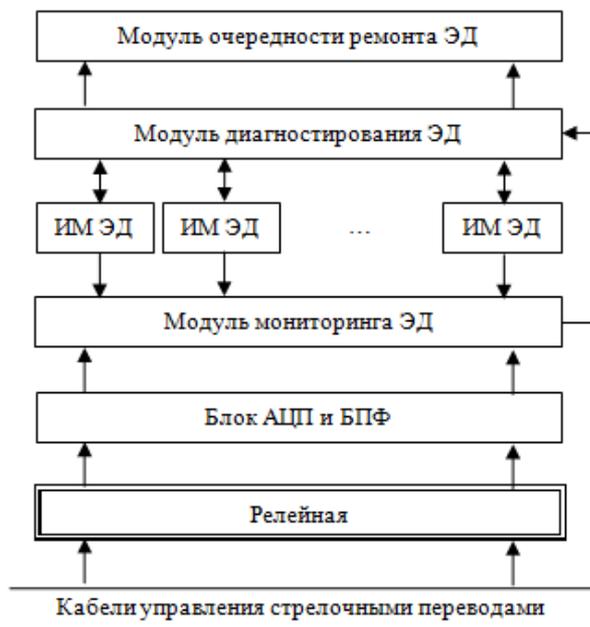


Рис. 1. Многоуровневая система управления эксплуатацией парка электродвигателей стрелочных переводов

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. 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.

### Получение частотного спектра рабочего тока электродвигателя

Для получения спектра рабочий ток двигателя был дискретизирован. Разрядность выборки составляла 16 бит, а частота дискретизации –  $f_d = 11025$  Гц. Для последующей 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  $f_{\max} = 0,5 \cdot f_d = 5512,5$  Гц, что достаточно для отражения физических процессов в двигателе.

При получении частотного спектра тока двигателя размер блока БПФ  $F_s$  был выбран равным  $F_s = 512$ . Следовательно, ток двигателя был представлен  $N_h = 0,5 \cdot F_s = 256$  гармониками преобразования Фурье. Частотное разрешение гармоник спектра при этом составило  $\Delta f = \frac{f_{\max}}{N_h} \approx 21,5$  Гц. Каждая гармоника в полученном множестве гармоник  $\{f_i\}$  имела частоту, равную

$$f_i = \Delta f * i \text{ Гц, } i = \overline{1, N_h}, \quad (1)$$

и была представлена парой коэффициентов  $(\text{Re}_i, \text{Im}_i)$ ,  $i = \overline{1, N_h}$ .

Для каждой гармоники преобразования Фурье вычислялась интенсивность частоты  $I_i$ :

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

Полученные значения интенсивностей гармоник преобразования Фурье рабочего тока ЭД использовались моделями интеллектуальных систем (ИС) для выявления неисправностей в двигателях железнодорожных стрелочных приводов.

### Планирование очередности ремонтов электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов на основе индивидуальных моделей

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 [4], 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 [3, 5].

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  $d_i$ :

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

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  $P_z = \max_i (d_i)$ .

### Выводы

В работе разработаны методы и средства, предназначенные для эффективной эксплуатации по текущему техническому состоянию парков электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов. При этом усовершенствованы методы мониторинга и диагностирования электродвигателей стрелочных переводов, использующие модели интеллектуальных систем.

Разработанные методы диагностики и математические модели позволяют выявлять боль-

шее число неисправностей электродвигателей, чем методы, применяемые на железных дорогах Украины. Усовершенствована автоматизированная технология диагностики электродвигателей, которая основана на анализе частотного спектра рабочего тока двигателя. Диагностика может проводиться как на стенде во время планового осмотра, так и без извлечения двигателя из стрелочного привода. Разработанная система диагностики реализует мониторинг технического состояния электродвигателей парка стрелочных переводов.

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.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ивченко, Ю. Н. Методы автоматизированного управления парком электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов «по текущему состоянию» [Текст] / Ю. Н. Ивченко, О. М. Шве́ц, М. В. Скалозуб // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 4. – С. 96–102.
2. Автоматизация процессов диагностики электродвигателей стрелочных переводов в условиях эксплуатации [Текст] / А. П. Разгонов [и др.] // Заліз. трансп. України. – 2009. – № 6. – С. 20–22.
3. Скалозуб, В. В. Метод и информационные технологии нечетко-статистического управления [Текст] / В. В. Скалозуб // Системні технології. Регіональний міжвузівський зб. наук. пр. – Вип. 1 (50). – Д., 2008. – С. 120–127.
4. Скалозуб, В. В. Нейросетевые модели диагностики электродвигателей постоянного тока [Текст] / В. В. Скалозуб, О. М. Шве́ц // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – № 4. – С. 7–11.
5. Шве́ц, О. М. Классификация объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил [Текст] / О. М. Шве́ц // Системні технології. Регіональний міжвузівський зб. наук. пр. – Вип. 3 (68). – Д., 2010. – С. 133–139.

Поступила в редколлегию 10.11.2011.

Принята к печати 15.11.2011.

В. В. СКАЛОЗУБ, О. М. ШВЕЦЬ

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ МОНІТОРИНГУ ТА УПРАВЛІННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЄЮ ПАРКУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРІВ ПОТОЧНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ**

Розроблена технологія експлуатації парків електродвигунів залізничних стрілочних переводів з використанням нечітко-статистичних експертних систем. Технологія включає моніторинг і діагностику поточного технічного стану двигунів без виключення з приводу, дозволяє визначити черговість ремонтів двигунів.

*Ключові слова:* парк електродвигунів, моніторинг, діагностування, нечітко-статистичні експертні системи, експлуатація по поточному стану.

$$n \frac{\gamma_i}{\gamma_0} dt$$

V. V. SKALUZUB, O. M. SHVETS

## **AUTOMATION OF MONITORING AND EXPLOITATION MANAGEMENT OF POINTWORK ELECTRIC MOTOR PARKS BASED OF THE PARAMETERS OF CURRENT TECHNICAL STATE**

Exploitation technology of pointwork electric motor parks is developed based on the fuzzy-statistical expert system. Technology includes monitoring and diagnostics of engine current technical state without an exception from a drive, allows defining the order of engine repairs.

*Keywords:* electric motor park, monitoring, diagnosis, fuzzy-statistical expert system, current state exploitation.