

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.212.5

В. В. СКАЛОЗУБ<sup>1\*</sup>, И. В. КЛИМЕНКО<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта skalozhubtk@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

<sup>2\*</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта vanya.klymenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5149-3974

### МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАРКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Цель.** Основной целью статьи является совершенствование автоматизированных систем эксплуатации парков железнодорожных технических систем – электродвигателей (ЭД) постоянного тока стрелочных переводов, с учетом факторов неопределенности. **Методика.** Решение задачи получено за счет развития модели и метода оптимального планирования процессов эксплуатации множества ЭД. Метод использует информационную технологию по оценке параметров текущих и прогнозируемых состояния ЭД на основе их индивидуальных моделей. Модели формируют как для отдельных ЭД, так и для заданных групп. В модели факторы недетерминированности учитывают на основе показателя Херста. Задача планирования сводится к расчету оптимальной последовательности обслуживания объектов парка ЭД, которая обеспечивает минимум общих ожидаемых эксплуатационных затрат. **Результаты.** В работе был выполнен анализ основных известных моделей, автоматизированных технологий и систем эксплуатации парков ЭД (АСЭД) на основе дистанционного мониторинга. Исходя из практики обслуживания парков ЭД, была предложена новая категория объектов анализа – группа обслуживания (ГЭД). Для повышения достоверности прогнозирования по индивидуальным моделям ЭД и ГЭД разработана процедура классификации процессов, использующая показатель Херста. Сформулирована технолого-экономическая модель по планированию процессов эксплуатации парков ЭД. Выполнено развитие автоматизированной системы управления парков ЭД (АСУЭД) на основе усовершенствованной модели планирования процессов эксплуатации парков стрелочных ЭД постоянного тока. Модель оптимального планирования обеспечивает минимизацию ожидаемых эксплуатационных затрат на эксплуатацию парка ЭД за счет выбора очередности обслуживания групп ЭД. При планировании используют специализированную процедуру классификации недетерминированных данных дистанционного мониторинга ЭД, которая позволяет повысить точность прогнозирования параметров состояний объектов. **Научная новизна.** В статье получили развитие математические модели и информационные технологии дистанционного мониторинга процессов эксплуатации парков железнодорожных технических систем, стрелочных ЭД, основанные на формировании индивидуальных моделей ЭД и ГЭД, на оценке их текущих и прогнозируемых состояний, с учетом случайных факторов. Предложенная модель оптимального планирования, как выбора последовательности обслуживания ГЭД, отличается групповым обслуживанием объектов парка ЭД, а также применением специализированной процедуры классификации данных мониторинга ЭД. **Практическая значимость** полученных результатов определяется обеспечением новых возможностей группового оптимального планирования обслуживания парка ЭД по критерию минимума ожидаемых затрат. Процедура классификации данных мониторинга процессов эксплуатации позволяет повысить достоверность результатов прогнозирования антиперсистентных

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

временных последовательностей, а также обеспечивает получение интерпретации результатов классификации данных наблюдений, исходя из потребности практического применения.

*Ключевые слова:* парки технических систем; электродвигатели стрелочных переводов; процессы эксплуатации; условия неопределенности; автоматизированная система; мониторинг; прогнозирование; индивидуальные модели процессов; модель оптимального планирования; эксплуатационные затраты

### Введение

В настоящее время одной из приоритетных задач железнодорожного транспорта Украины является всестороннее уменьшение эксплуатационных расходов и повышение эффективности процессов автоматизированной эксплуатации парков технических систем (ТС) [1, 5, 8]. В представленной статье в качестве объектов исследования рассмотрены парки электродвигателей (ЭД) постоянного тока, используемых в железнодорожных стрелочных переводах (СП) – важных системах управления процессами перевозок. Количество этих систем составляет несколько десятков тысяч. Только в Юго-Западном филиале их насчитывается около 6 тис. Основная цель работы заключается в совершенствовании метода оптимального планирования процессов эксплуатации парка ЭД (МОПЭД), а также в развитии соответствующих систем автоматизированного дистанционного мониторинга и диагностирования текущего и прогнозируемого состояния объектов парка ЭД. Планирование процессов эксплуатации парка ЭД здесь заключается в расчете такой оптимальной последовательности обслуживания групповых объектов парка (ГЭД), которая обеспечивает минимальные общие затраты на его эксплуатацию, при условии соблюдения требований по устойчивости и надежности процессов железнодорожных перевозок. Особенностью процедур анализа и прогнозирования параметров состояния является обслуживание групп ТС (ГЭД), а также применение метода классификации временных последовательностей [7], представляющих оценки параметров процессов эксплуатации ЭД.

На железных дорогах Украины процессы эксплуатации ЭД осуществляются на основе плано-предупредительного метода (ППМ) [4], согласно которому процедуры оценки текущего состояния предусматривают исключение ЭД из реальных процессов для организации комплекса работ по контролю элементов ТС, по

измерению значений их параметров. Отмечено в [1, 6], что изъятие ЭД из процессов эксплуатации требует существенных дополнительных временных, финансовых, материальных и других затрат, а главное – может влиять на оценки значений параметров состояний ТС.

По технологии ППМ эксплуатации стрелочных переводов и их ЭД устанавливают их периодическое обследование по составленному графику [1, 2, 5]. К недостаткам существующей технологии обслуживания СП относят значительные затраты времени, выполнение операций в ручном режиме, большую вероятность человеческого фактора. Вместе с этим отсутствует непрерывный контроль параметров СП, что делает невозможным своевременное выявление и ликвидацию неисправностей. В условиях внедрения высокоскоростного движения поездов актуальность задачи повышения эффективности автоматизированного обслуживания парков СП и ЭД возрастает.

Развитие автоматизированных систем управления эксплуатацией парков ТС, в том числе стрелочных ЭД, происходит на основе применения современных информационных технологий (ИТ) и методов искусственного интеллекта [1, 5, 8]. В рамках этого направления разрабатываются новые решения задачи по организации и интеграции данных мониторинга, диагностирования, а также по обобщению результатов эксплуатации парка ЭД и планированию. Установлено, что повышение результативности этих методов и соответствующих технологий их реализации с учетом текущего состояния возможно на основе использования средств интеллектуальных систем: моделей кластеризации, методов искусственных нейронных сетей, экспертных систем [4, 12, 14]. В работах [5, 6, 8] предложена технология эксплуатации ЭД постоянного тока, которая не требует их извлечения из СП. Она позволяет выполнять непрерывную дистанционную диагностику ЭД, устраняет многие недостатки ППМ обслуживания стрелок электрической

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

централизації. Эта технология позволяет повысить точность измерения параметров, сократить время проверки состояния стрелок электрической централизації, снизить требования к квалификации обслуживающего персонала и уменьшить срок его пребывания на железнодорожных путях в зонах повышенной опасности, автоматизировать процессы диагностирования ЭД и др.

Переход к автоматизированной эксплуатации парков ЭД является экономически выгодным, позволяет повысить надежность стрелочных электроприводов, даже с учетом отказов, которые проявляются только при работе стрелочного перевода. Такой вывод в полной мере соответствует мировым тенденциям по внедрению систем дистанционного диагностирования и созданию автоматизированных рабочих мест (АРМ) [1, 5, 8].

Как примеры применения современных автоматизированных систем дистанционного диагностирования парков ЭД (АСЭД) на рис. 1, 2 представлены спектральные характеристики токов ЭД железнодорожных СП модели МСП-0,25, которые соответствуют их различным неисправностям. Виды неисправностей ЭД определены экспертом по методике [1, 2, 5].

На спектрограммах по оси абсцисс отложено время, по оси ординат – частота гармоник спектра.

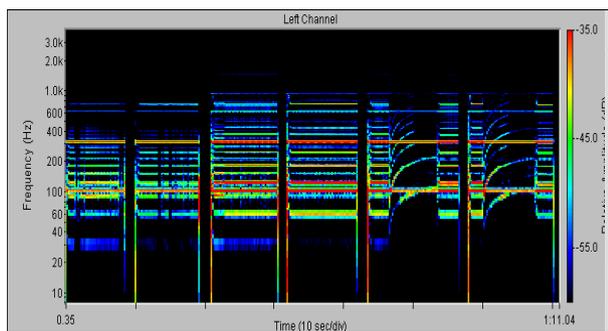


Рис. 1. Спектрограмма двигателя модели МСП-0,25: два обрыва якоря и короткое замыкание пластин коллектора

Fig. 1. Spectrogram of the MSP-0.25 engine: two armature breaks and short circuit in the collector plates

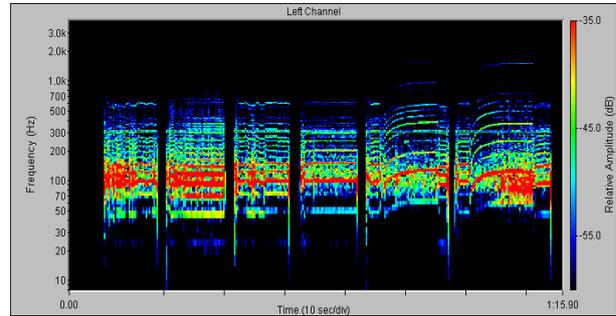


Рис. 2. Спектрограмма двигателя МСП-0,25: четыре места обрыва секций якоря

Fig. 2. Spectrogram of the MSP-0.25 engine: four places where the armature sections break

Отметим, что совокупность неисправностей (рис. 1, 2) обнаружена только с помощью расчетов на основе анализа спектров токов, а не статическими методами измерений (с помощью омметра, трансформатора, импульсного и др.).

АСЭД осуществляет управление процессами дистанционного диагностирования, а также решает отдельные задачи эксплуатации парков ЭД [1, 2, 7]. В АСЭД выполняют измерения характеристик двигателей, которые находятся под влиянием номинальных, рабочих значений напряжения, токов, магнитных полей, центробежных сил. АСЭД базируется на анализе частотного спектра рабочего тока двигателя, реализованного с помощью быстрого преобразования Фурье [2, 5]. Для каждого ЭД в индивидуальных моделях (ИМЭД) сохраняют характеристики исправного состояния, которые используют для расчета оценки достоверности выявленных неисправностей при диагностике. Распознавание возможных неисправностей ЭД выполняют нейронными сетями Кохонена [11]. Анализ взаимного расположения кластеров на топологической карте Кохонена позволяет выявлять сходства или различия между разными видами неисправностей (обрыв секции якоря, круговой огонь и др.). Входной слой сети Кохонена состоит из 256 элементов, на каждый из которых подаются величины интенсивности гармоник преобразования Фурье тока ЭД. Выходной слой сети представляет собой топологическую карту. В результате экспериментов лучшую способность к кластеризации показала топологическая карта размерностью 3 на 5 элементов [5, 6]. На основе текущего и прогнозируемого технического состояния каждого ЭД

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

в дальнейшем определяют очередности их обслуживания.

В [8] для реализации непосредственных процедур управления парком ЭД с учетом их технического состояния разработана двухуровневая система математических моделей, верхний уровень которой представляет главные контролируемые свойства парка в целом, а также обеспечивает определение оценок параметров текущего состояния. На нижнем уровне формируются ИМЭД, представляющие эволюцию состояний ЭД.

### Цель

Целью статьи является развитие и совершенствование вышеизложенных моделей, методов и подходов, а именно:

- совершенствование индивидуальных моделей процессов эксплуатации как отдельных ЭД, так и построение моделей определенных групп ЭД (ГЭД);
- формирование общей экономико-технологической модели ГЭД для расчета последовательности обслуживания заданных групп ТС ГЭД;
- применение усовершенствованного метода прогнозирования показателей процессов эксплуатации ГЭД за счет процедуры классификации последовательностей данных мониторинга ИМЭД.

### Методика

Содержательно задачу автоматизированного управления эксплуатацией парка АСЭД можно сформулировать следующим образом. Рассматривают и автоматизировано контролируют определенное множество сложных технико-технологических объектов одинакового назначения (в частности ЭД), парк технических систем, а также процессы их эксплуатации. В соответствии с технологией функционирования и методикой обслуживания ТС парка разделены на группы (ГЭД), элементы которых при планировании рассматривают совместно. Объекты парка характеризуются наборами свойств, значения которых указывают на их некоторое «текущее» состояние, отражающее ход и возможности дальнейшей эксплуатации каждой из ТС. Техническое состояние объекта на данном

этапе эксплуатации определяют по «сигналам», снимаемым с него, причем дистанционно, без исключения из процессов эксплуатации. Данные о параметрах текущего состояния соответствующим образом обрабатывают, анализируют и обобщают, а также накапливают в системе АСЭД. Считаются известными ресурсы (технические, материальные, трудовые и др.), необходимые или выделенные для эксплуатации парка объектов. Задача состоит в обеспечении реализации и надежности совокупности железнодорожных транспортных технологий парка ТС. Также нужно обеспечить повышение эффективности процессов эксплуатации парка объектов, что выполняют на основе формирования интеллектуальной автоматизированной технологии и системы оптимального управления по текущему и прогнозируемому состоянию. При этом нужно непрерывно определять текущее техническое состояние компонентов парка ТС. Результатами мониторинга являются оценки параметров текущего состояния. Эту информацию фиксируют в индивидуальных моделях процессов эксплуатации ЭД в виде временных рядов (ВР) [5, 7, 8].

При обнаружении неисправных состояний объекта необходимо определить вид неисправности и получить оценку достоверности. На основе данных мониторинга объектов и предварительных данных о процессах эксплуатации, представленных в детерминированных терминах, или с учетом характеристик неопределенности технологических или эксплуатационных процессов нужно спрогнозировать возможные изменения технического состояния элементов системы, а также установить рациональные очередности диагностики и обслуживания объектов парка ТС с учетом требований безопасности транспортной системы и ограниченных ресурсов процессов эксплуатации.

Для определения очередности обслуживания объектов парка ЭД как части планирования процессов эксплуатации применяют специализированные экономико-математические модели и методы оптимального планирования, рассмотренные ниже. Задача эксплуатации парков заключается в определении последовательности обслуживания (диагностирования, осмотров ЭД, ремонтов) ТС или их элементов, а также групп ГЭД с учетом приближенных оценок

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

их текущего и прогнозируемого состояния, которые обеспечивают минимальные общие эксплуатационные расходы.

### Результаты

Представим задачу автоматизированного оптимального управления эксплуатацией парков ТС (ЭД), развивая метод [6-8], как последовательность реализации следующих задач:

1. Образование групп ЭД парка, формирование индивидуальных моделей процессов эксплуатации стрелочных ЭД, ИМ для ГЭД, общей технологического-экономической модели эксплуатации парка.

2. Дистанционное измерение, мониторинг, спектральный анализ рабочих токов, диагностирование текущих состояний ЭД.

3. Оценка параметров и состояний инфраструктуры, классификация ИМ отдельных ЭД, а также их ГЭД, прогнозирование характеристик состояний объектов парка.

4. Формирование оптимального плана как выбора последовательности обслуживания ГЭД.

5. Реализация управления этапа  $T$ , выполнение и учет в информационных моделях результатов работ по эксплуатации парка ЭД.

6. Коррекция индивидуальных моделей ЭД, ГЭД, а также парка в целом.

Для реализации указанной постановки задачи оптимального планирования потребовалось ввести новую категорию моделей объектов парка – ГЭД, модели групповых свойств ЭД (стрелочные переводы станции, ее участков и т. п.). Формирование и учет групповых свойств объектов парка выполнен с помощью специализированных процедур АСЭД.

При заданных множествах групп ЭД, одновременно включаемых в план обслуживания, возникает задача по оценке характеристик ГЭД, представленных ВР, на основе свойств отдельных ЭД. С учетом требований обеспечения надежности транспортных систем параметры ГЭД определяют на основе функций  $\max/\min$ . Поскольку на различных этапах обслуживания реализация функций расчета групповых свойств ГЭД может быть на разных двигателях, то поведение ВР групповых свойств может иметь сложный недетерминированный харак-

тер [10]. Ряды групповых свойств могут быть антиперсистентными [7, 9], как и последовательности значений уровней ВР отдельных ЭД. Рассмотрим вопросы прогнозирования и планирования процессов эксплуатации парков ЭД, представленных в ИМЭД недетерминированными ВР.

Данные о процессах эксплуатации железнодорожного транспорта, накапливающиеся в различных автоматизированных системах управления (АСУ), можно рассматривать как временные ряды (ВР) – упорядоченные по этапам контроля значения заданных показателей. Оценки показателей имеют сложную динамическую структуру и отражают свойства технологических, эксплуатационных, финансовых [9, 10] и других процессов железнодорожного транспорта. В работах [5, 7] исследованы возможности применения новых методов анализа ВР, представляющих свойства вагонопотоков, на основе показателя Херста (ХВ) [5]. ХВ оценивает стохастичность ряда, наличие в нем долговременной «памяти», используя процедуру R/S-анализа. Значение ХВ позволяет классифицировать процессы на персистентные (трендостойкие,

$H > 0,5$ ), антиперсистентные (излом тенденции,  $H < 0,5$ ), случайные ( $H \approx 0$ ), используя величины вида:

$$H = \frac{\log(R/S)}{\log(a * N)}, \quad (1)$$

где  $H$  – показатель Херста;  $S$  – среднее квадратическое отклонение ВР;  $R$  – размах накапливаемых отклонений;  $N$  – число периодов наблюдений;  $a$  – константа ( $a = \pi/2$  для «коротких» ВР, соответствующих реальным процессам железнодорожных перевозок) [9, 13].

В работах [6-8] были исследованы свойства ВР, характеризующих количество вагонов, отправленных по станциям за сутки. Было выяснено, что показатель Херста этих ВР часто находится в интервале [0,3; 0,5], то есть сведения о предыдущих свойствах и поведении ВР не сохраняются. Это свидетельствует о проблемах прогнозирования и планирования процессов эксплуатации парков ТС.

Для дальнейшего исследования процессов, описывающихся ВР в области «белого шума»

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

( $H = [0,4, 0,5]$ ) була розроблена процедура усереднення рівней ВР, а також проведена процедура ПКР – класифікації ВР. Згідно ПКР, на основі вихідного ВР формується серія нових ВР:  $ВР_i(k)$ ,  $k = 2, 3, \dots$ . Тут параметр  $k$  вказує кількість послідовно розташованих рівней ряду, які використовують для побудови наступного рівня перетвореного ряду (як середнього значення рівней  $k$ ) на  $i$ -му етапі процедури ПКР. Далі знову сформовані  $ВР_i(k)$  досліджують на основі моделі (1). Побудова  $ВР_i(k)$  закінчується, якщо для деякого  $k$  відповідний  $ВР_i(k)$  стає персистентним за (1), або ж на  $i$ -му етапі ПКР будуть виконані вимоги:  $H(ВР_i(k)) > H^*$ ,  $H^*$  – задано. К отриманим на  $k$ -му етапі модифікованим рядам  $ВР_i(k)$  далі застосовують стандартні статистичні методи моделювання та прогнозування.

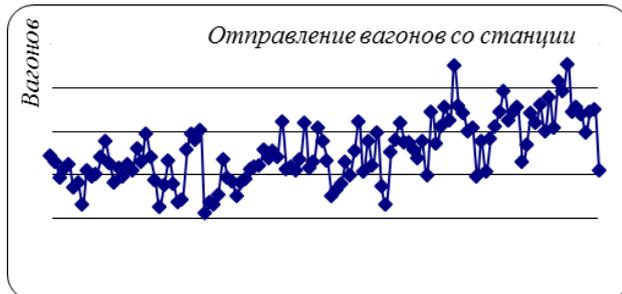
Рис. 3. ВР вагонотока при  $k = 3$  суток,  $H = 0,71$ .

Fig. 3. Time series of the car traffic volume at  $k = 3$  days,  $H = 0,71$

На рис. 3 приведено приклад ВР (3) вагонотока на станції, отриманий при агрегуванні за 3 сутки (ВР третього класу). Його показник Херста (1) дорівнює  $H = 0,71$ , але  $ВР_1(k)$  був  $H = 0,18$ . Таким чином, для ВР (рис. 3) на практиці можливо прогнозування оцінок показників (витрати, кількість вагонів тощо) «з кроком 3».

Процедура ПКР усереднення рівней дозволяє диференціювати процеси, представлені ВР, встановлюючи  $k$ , при яких можливо більш обґрунтоване формування моделей прогнозування. На рис. 4 і 5 наведено приклади ВР різних класів, виявлених на основі ПКР.

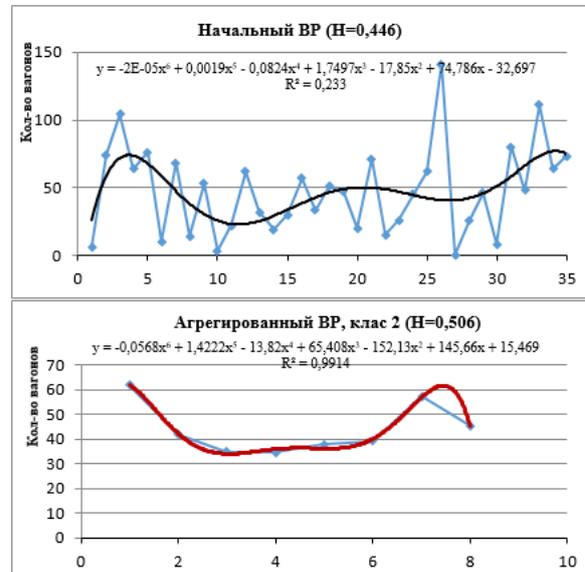


Рис. 4. Пример процессов класса 2

Fig. 4. An example of processes, class 2

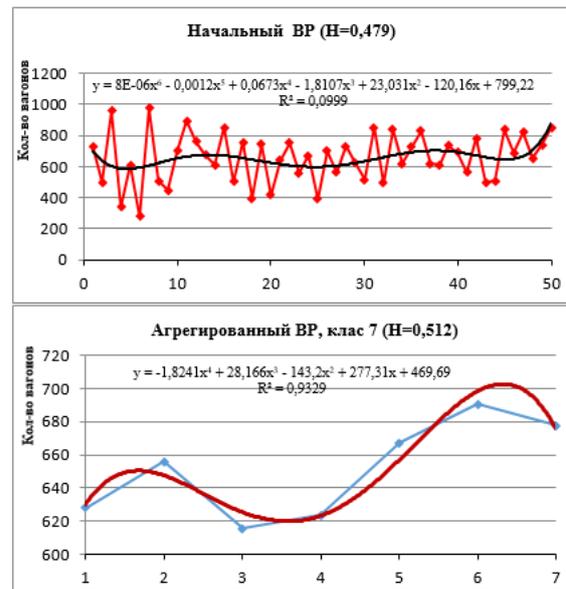


Рис. 5. Примеры классификации ВР железнодорожных процессов

Fig. 5. Examples of the time series classification for the railway processes

Зліва зверху (рис. 4 і 5) вказані вихідні, а знизу відповідні перетворені ВР, а також дані значення їх показників Херста (1) і коефіцієнти детермінації моделей [5, 11].

Одним з відмінних властивостей методу експлуатації парку ТС, розроблюваного

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

в статье, является применение процедуры ПКР для классификации ВР процессов эксплуатации, формируемых в ИМЭД и ГЭД (этап 3, классификация ВР).

Модуль мониторинга сравнивает полученный спектр тока ЭД со спектром его исправного состояния, хранимого в соответствующей ИМЭД. При обнаружении «существенных» различий этих спектров спектральные характеристики рассматриваемого ЭД поступают в модуль диагностирования, на выходе которого получают как виды, так и оценки достоверности выявленных неисправностей. Эти оценки хранятся в ИМЭД, формируя ВР, далее используемый для прогнозирования технического состояния электродвигателя.

Структура системы ИМ процессов эксплуатации парка ЭД (мониторинг, диагностирование, прогнозирование, ремонты) имеет вид иерархии (рис. 6). Уровни моделей сформированы по функциональному назначению. ИМ-0 – представляет собой совокупность моделей АСЭД согласно [6, 8].

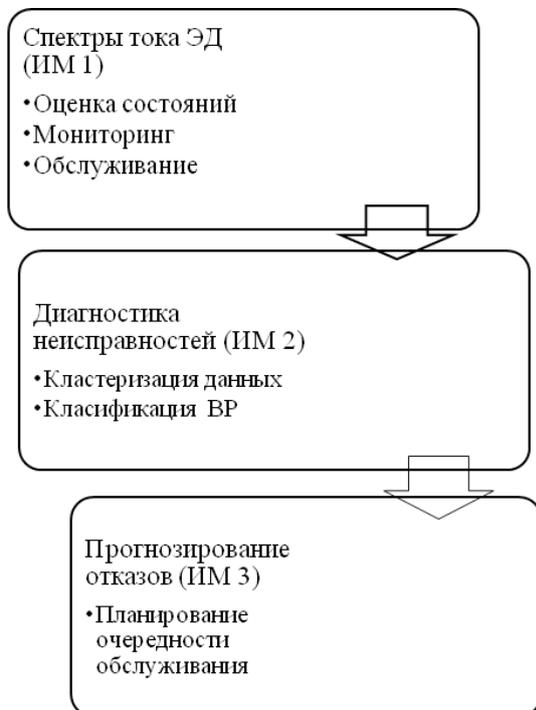


Рис. 6. Система индивидуальных интеллектуальных моделей процессов эксплуатации парка ЭД

Fig. 6. The system of individual intellectual models of the park operation processes of electric motors

Уровень ИМ-1 обеспечивает данными процедуры определения текущего состояния парка ЭД. Модели уровня ИМ-2 используют для процедур кластеризации данных спектров, а также классификации ВР, получаемых при мониторинге. Для определения класса ВР применяют процедуру ПКР. Данные о спектрах тока ЭД дают возможность установить существующие или же скрытые неисправности контролируемых устройств, которые могут возникнуть на следующих этапах эксплуатации ЭД, а также оценить ожидаемый срок до их проявления.

Выявленные на основе ИМЭД (рис. 5) непосредственные или потенциальные неисправности ЭД анализируют моделями прогнозирования и планирования процессов эксплуатации (ИМ-3). Оценки параметров ИМ-3 используют для решения задач оптимизации очереди обслуживания ГЭД.

Для формирования процедур мониторинга состояний парка ЭД в реальном масштабе времени могут быть использованы методы и средства автоматизации станций [14]. Обработку и интерпретацию данных ИМ, с учетом возможности развития парка ЭД, а также расширения перечня контролируемых параметров объектов, обеспечивают современные технологии онтологической поддержки процедур классификации [12], концептуального моделирования данных сложной структуры [13] и др. Использование указанных методов и технологий позволяет создавать современные АСУЭД, реализующие также и задачи прогнозирования и планирования процессов эксплуатации парков ЭД железнодорожных стрелочных переводов.

С учетом процедур ПКР набор данных ИМЭД электродвигателей содержит следующие характеристики:

- временные последовательности (ВР) спектров тока ЭД;
- информация о свойствах ВР – константа Херста (1) исходного ВР, класс ВР, а также значение XV преобразованного ВР, построенного по процедуре ПКР;
- классификация возможных отказов ЭД по спектрам тока (вид неисправности, а также достоверность этого состояния) – прогнозный период до события, полученный методом линейной экстраполяции [6];

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

– оценки числа переключений стрелки за установленный период.

На основе ИМЭД формируют  $ИДГ_k$  – модели обслуживания групп ЭД при эксплуатации. Общую оценку свойств  $ИДГ_k$  получают на основе функций  $\max/\min$ , применяемых к показателям каждого ЭД группы. В набор свойств  $ИДГ_k$  входят: затраты на нормативное обслуживание ( $ЗН_k$ ), дополнительные технологические затраты при выходе двигателей из строя ( $ДЗ_k$ ), нормативное число переключений стрелок за установленный период ( $NT_k$ ). По  $NT_k$  вычисляют аналоги вероятности для расчета показателя возможных общих затрат. Также для  $ИДГ_k$  на основе показателя Херста вычисляют свойства группового ВР, его класс (процедура ПКР). В случае необходимости выполняют классификацию преобразованного по ПКР ряда, что позволяет уточнить модели прогнозирования процессов эксплуатации для ГЭД и ЭД.

Модель оптимального планирования очередности обслуживания (МОПОО) ГЭД реализуют следующим образом. Считаются заданными период планирования  $T$  и  $\max$  ресурс на обслуживание (максимально возможное количество ЭД, которое можно обслужить за период  $T$ ) –  $ED(T)$ . Для каждой  $ИМГЭД_k$  на основе ее  $ВР_k$  определяют количество возможных отказов за период  $T$  –  $n(T)$ , а также их виды. Кроме того, устанавливают ГЭД, которые подлежат плановому обслуживанию согласно нормативов (ПНО) [1] –  $ГЭД_H(T)$  и количество ЭД в них –  $n_H(T)$ . Таким образом, суммарное количество ЭД в каждой группе, которые подлежат ремонту:

$$n_{ГЭД_k}(T) = n(T) + n_H(T)$$

При этом если  $n(T) = 0$ , то ГЭД подлежит только нормативному обслуживанию. В этом случае форматируется множество  $G(T)$ :

$$G(T) = \{ГЭД_k(T)\}, \forall n_{ГЭД_k} > 0.$$

Если количество  $ГЭД(T)$  в плановом периоде, которые подлежат обслуживанию,

$$(n_{ГЭД_k}(T) > 0, \forall k = \overline{1, ED(T)})$$

не превышает 12, достаточно будет использовать перебор всех возможных вариантов перестановки ГЭД. При большом  $n_{ГЭД_k}(T) > 14$  выбор оптимальной перестановки можно осуществить с использованием поисковой оптимизации – генетических алгоритмов [4, 6, 12].

Для формирования модели расчета очередности обслуживания ГЭД разработан специализированный показатель эффективности планирования. Показатель соответствует оценкам ожидаемых дополнительных затрат (ОДЗ) за период планирования  $T$ . Очередность обслуживания ГЭД, при которой эти затраты минимальны, является оптимальной. Величину ОДЗ рассчитывают так:

– по модели  $ИДГ_k$  выбирают  $ДЗ_k$  и  $NT_k$ , на основе которых вычисляют оценки вероятностей событий отказов в группе  $P(NT_k)$ ;

– для ЭД, входящих в  $ИДГ_k$ , по моделям ИМЭД определяют общие дополнительные затраты  $ДЗ_{рем}$  на ремонт ЭД, которые могут выйти из строя в период планирования (с учетом возможного прогнозируемого типа отказа):

–  $ЗН_k$  нормативные затраты на ремонт ЭД (убрать?).

$$ДЗ_{рем} = \sum_n Z_{вид\ рем} * n_{ЭД}.$$

Значение  $ОДЗ_k$  равно:

$$ОДЗ_k = (ОДЗ_k * P(NT_k)) + ДЗ_{к\ рем} + ЗН_k.$$

МОПОО ГЭД имеет вид:

$$\sum_{k=1}^n ОДЗ_k \rightarrow \min. \quad (2)$$

Условие отбора ГЭД в множество  $G(T)$  осуществляют с учетом (2).

При расчете  $ОДЗ_k$  был установлен период планирования, по которому вычислены  $ОДЗ_k$ . В то же время в процессе эксплуатации возможны события, которые требуют оперативной коррекции плана. Эти события приводят к появлению новых групп  $ИДГ_k$ , в которых в пе-

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

риод планирования могут произойти отказы (по результатам диагностики токов ЭД). Принятие решений относительно таких групп ЭД – задача оперативного планирования эксплуатации парка ЭД.

ВР спектров токов могут рекомендовать несколько видов возможных неисправностей одновременно, но с разными временами их возможного проявления. Исходя из этих данных, проводят расчет оценок надежности транспортной системы, по которым и выбирают группу ЭД для первоочередного обслуживания.

### Научная новизна и практическая значимость

В статье получили развитие метод и информационные технологии дистанционного мониторинга и оптимального планирования процессов эксплуатации парков железнодорожных технических систем. Научная новизна полученных результатов определяется следующим: впервые предложена модель оптимального планирования, как выбора последовательности обслуживания групп объектов парка ЭД. Усовершенствованы индивидуальные модели эксплуатации ЭД и ГЭД, которые отличаются дополнительной информацией по классификации данных мониторинга ЭД, что позволяет уточнить оценки текущих и прогнозируемых состояний с учетом случайных факторов.

Полученные результаты обеспечивают новые возможности группового оптимального планирования обслуживания парка ЭД по критерию минимума ожидаемых затрат. Процедура классификации данных мониторинга позволяет повысить достоверность результатов прогнозирования антиперсистентных временных последовательностей, а значит и обоснованность планов по очередности обслуживания объектов парка ЭД.

### Выводы

В статье исследованы вопросы совершенствования метода планирования процессов эксплуатации парка технических средств, основанного на прогнозировании состояний ЭД и групп ЭД по данным индивидуальных моделей. Для определения оптимальной последовательности обслуживания парка ЭД была разработана МОПОО позволяющая повысить достоверность определения очередности обслуживания ГЭД, используя оценки показателя Херста.

Предложена новая категория объектов анализа – группа обслуживания (ГЭД). Полученная модель обеспечивает минимизацию затрат по ГЭД на эксплуатацию парка ЭД за счет применения специализированной процедуры классификации индивидуальных данных дистанционного мониторинга параметров ЭД.

### СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизация процессов диагностики электродвигателей стрелочных переводов в условиях эксплуатации / А. П. Разгонов, А. Б. Руденко, В. В. Скалзуб, О. М. Швец // Залізн. трансп. України. – 2009. – № 6. – С. 20–22.
2. Дистанционное диагностирование состояния стрелочных переводов по временной характеристике и спектральному составу токовой кривой / С. Ю. Буряк, В. И. Гаврилюк, О. А. Гололобова, М. А. Ковригин // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 2 (56). – С. 39–57. doi: 10.15802/stp2015/42159
3. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування : ЦШ 0060. – Київ : Укрзалізниця, 2009. – 111 с.
4. Максишко, Н. К. Аналіз і прогнозування еволюції економічних систем : монографія / Н. К. Максишко, В. О. Перепелиця. – Запоріжжя : Поліграф, 2006. – 236 с.
5. Скалзуб, В. В. Индивидуальные интеллектуальные модели для эксплуатации парка однородных железнодорожных технических систем на основе параметров текущего состояния / В. В. Скалзуб, В. Н. Осовик // Інформ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2014. – № 6. – С. 8–12.
6. Скалзуб, В. В. Методи інтелектуальних транспортних систем в задачах управління парками об'єктів залізничного транспорту по поточному стану / В. В. Скалзуб, О. М. Швец, В. Н. Осовик // Питання прикладної математики і математичного моделювання : зб. наук. пр. / Дніпропетр. нац. ун-т ім. О. Гончара. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 229–242.

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

7. Скалозуб, В. В. Розвиток процедур аналізу та прогнозування недетермінованих технологічно-економічних процесів на основі показників хаотичної динаміки / В. В. Скалозуб, И. В. Клименко // Економіка: реалії часу. – 2016. – № 4 (26). – С. 82–90.
8. Создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений в единой автоматизированной системе управления грузовыми железнодорожными перевозками Украины / В. В. Скалозуб, И. В. Жуковичкий, И. В. Клименко, А. П. Заец // Системні технології : регіон. міжвуз. зб. наук. пр. – Дніпро, 2018. – № 3 (116). – С. 153–162.
9. Faggini, M. The failure of economic theory. Lessons from chaos theory / M. Faggini, A. Parziale // Modern Economy. – 2012. – Vol. 03. – Iss. 01. doi: 10.4236/me.2012.31001
10. Grabusts, P. Ontology-Based Classification System Development Methodology / P. Grabusts, A. Borisov, L. Aleksejeva // Information Technology and Management Science. – 2015. – Vol. 18. – Iss. 1. – P. 129–134. doi: 10.1515/itms-2015-0020
11. Kohonen, T. Self-Organizing Maps / T. Kohonen. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2001. – 501 p.
12. Ontology-Based System for Conceptual Data Model Evaluation / Z. Kazi, L. Kazi, B. Radulovic, M. Bhatt // International Arab Journal of Information Technology. – 2016. – Vol. 13, No. 5. – P. 542–551.
13. Piegat, A. Nonregular nonlinear sector modeling / A. Piegat // Applied Mathematics and Computer Science. – 1998. – Vol. 8, No. 3. – P. 101–123.
14. Zhukovyts'kyu, I. Use of an automaton model for the designing of real-time information systems in the railway stations / I. Zhukovyts'kyu // Transport problems. – 2017. – Vol. 12. – Iss. 4. – P. 101–108.

В. В. СКАЛОЗУБ<sup>1\*</sup>, І. В. КЛИМЕНКО<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта skalozhubtk@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

<sup>2\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта vanya.klymenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5149-3974

## МЕТОД ПЛАНУВАННЯ НЕДЕТЕРМІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

**Мета.** Основною метою статті є удосконалення автоматизованих систем експлуатації парків залізничних технічних систем – електродвигунів (ЕД) постійного струму стрілочних переводів, із урахуванням факторів невизначеності. **Методика.** Вирішення задачі отримано за рахунок розвитку моделі та методу оптимального планування процесів експлуатації множини ЕД. Метод використовує інформаційну технологію за оцінкою параметрів поточних і прогнозованих станів ЕД на основі їх індивідуальних моделей. Моделі формуються як для окремих ЕД, так і для заданих груп. У моделі чинники недетермінованості враховуються на основі показника Херста. Завдання планування зводиться до розрахунку оптимальної послідовності обслуговування об'єктів парку ЕД, яка забезпечує мінімум загальних очікуваних експлуатаційних витрат. **Результати.** У роботі був виконаний аналіз основних відомих моделей, автоматизованих технологій і систем експлуатації парків ЕД (АСЕД) на основі дистанційного моніторингу. Виходячи з практики обслуговування парків ЕД, була запропонована нова категорія об'єктів аналізу – група обслуговування (ГЕД). Для підвищення достовірності прогнозування за індивідуальними моделями ЕД і ГЕД розроблена процедура класифікації процесів, яка використовує показник Херста. Сформульована технологічно-економічна модель із планування процесів експлуатації парків ЕД. Виконано розвиток автоматизованої системи управління парків ЕД (АСУЕД) на основі удосконаленої моделі планування процесів експлуатації парків стрілочних ЕД постійного струму. Модель оптимального планування забезпечує мінімізацію очікуваних експлуатаційних витрат на експлуатацію парку ЕД за рахунок вибору послідовності обслуговування ГЕД. Під час планування використовують спеціалізовану процедуру класифікації недетермінованих даних дистанційного моніторингу ЕД, яка дозволяє підвищити точність прогнозування параметрів станів об'єктів. **Наукова новизна.** У статті отримали розвиток математичні моделі та інформаційні технології дистанційного моніторингу процесів експлуатації парків залізничних технічних систем, стрілочних ЕД, заснованих на формуванні індивідуальних моделей ЕД і ГЕД, на оцінці їх поточних і прогнозованих станів, із урахуванням випадкових чинників. Запропонована модель оптимального

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

планування, як вибору послідовності обслуговування ГЕД, відрізняється груповим обслуговуванням об'єктів парку ЕД, а також застосуванням спеціалізованої процедури класифікації даних моніторингу ЕД. **Практична значимість** отриманих результатів визначається забезпеченням нових можливостей групового оптимального планування обслуговування парку ЕД за критерієм мінімуму очікуваних витрат. Процедура класифікації даних моніторингу процесів експлуатації дозволяє підвищити достовірність результатів прогнозування антиперсистентних часових рядів, дозволяє отримати інтерпретацію класифікації, виходячи з потреби практичного застосування.

*Ключові слова:* парки технічних систем; електродвигуни стрілочних переводів; процеси експлуатації; умови невизначеності; автоматизована система; моніторинг; прогнозування; індивідуальні моделі процесів; модель оптимального планування; експлуатаційні витрати

V. V. SKALOZUB<sup>1\*</sup>, I. V. KLYMENKO<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Computer Information Technology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryana, Lazaryan, St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 373 15 35, e-mail skalozhubtk@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

<sup>2\*</sup>Dep. «Computer Information Technology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryana, Lazaryan, St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 373 15 35, e-mail vanya.klymenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5149-3974

## METHOD FOR PLANNING NON-DETERMINED OPERATION PROCESSES OF RAILWAY TECHNICAL SYSTEM PARK

**Purpose.** The article is aimed to improve the automated systems operation of the railway technical system parks and switch D.C. electric motors (EMs), taking into account all uncertainties. **Methodology.** Solution of the problem was obtained through the development of the model and the method for optimal planning for the EMs set operation. The method is based on the information technology with the possibility to assess the parameters of the current and the predicted state of EMs based on their individual models. The models are built both for individual EMs and for the specified groups. The factors of non-determinism in the model are calculated based on the Hurst index. The task of planning is solved as calculating the optimal sequence of the EM facilities services, which provides a minimum of the total expected operating costs. **Findings.** The analysis of the main known models, the automated technologies and the systems of EM (ASEM) park operation on the basis of the remote monitoring was done in the research. Based on the practice of the EM park maintenance the new category of the analysis objects was proposed – the service group (SG). The new procedure for the processes classification was developed based on using the Hurst index to improve the reliability of EM and SG individual models forecasting. The technological and the economic model for planning the EM parks operation was created. The article presents the results of the developed automated data management system based on the improved model for the operation planning of the D.C. EM parks. The optimal planning model ensures the minimization of the expected operating costs for the EMs operation, due to the selection of the EM groups service queue. The specialized procedure is used to classify non-deterministic EM remote monitoring data during planning, which allows increasing the accuracy of forecasting the object state parameters. **Originality.** The article describes development of the mathematical model and the information technology for the remote monitoring of the railway technical systems park operation, the railway switch EMs based on the formation of EM and SG individual models, as well as on the evaluation of their current and predicted states, taking into account random factors. The proposed model of the optimal planning as the possibility to choose the SG service queue differs by the group maintenance of the EM facilities, as well as application of the specialized procedure for classifying EM monitoring data. **Practical value.** The practical value of the results is determined by the provision of the new opportunities for the group optimal planning of the EM service based on the criterion of the minimum expected costs. The procedure for the monitoring data classification of the operational processes makes it possible to increase the reliability of the forecasting antipersistent time sequences results. It also provides an interpretation of the observational data classification results based on the need for practical usage.

*Keywords:* technical system parks; electric motors of switches; operational processes; uncertainty conditions; automated system; monitoring; forecasting; individual process models; optimal planning model; operating costs

## REFERENCES

1. Razgonov, A. P., Rudenko, A. B., Skalozub, V. V., & Shvets, O. M. (2009). Avtomatizatsiya protsessov diagnostiki elektrodvigatelya strelonnykh perevodov v usloviyakh ekspluatatsii. *Zaloznychnyi transport Ukrainy*, 6, 20-22. (in Russian)
2. Buryak, S. Y., Gavriyuk, V. I., Hololobova, O. O., & Kovryhin, M. O. (2015). Remote diagnostics of turnouts state on timing and spectral composition in current curve. *Science and Transport Progress*. 2(56), 39-57. doi: 10.15802/stp2015/42159 (in Russian)
3. *Instruktsiia z tekhnichnoho obsluhovuvannia prystroiv syhnalizatsii, tseentralizatsii ta blokuvannia*. (2009). Kyiv: Ukrzaliznytsia. (in Ukrainian)
4. Maksyshko, N. K., & Perepelytsia, V. O. (2006). *Analiz i prohnozuvannia evoliutsii ekonomichnykh system: Monografiya*. Zaporizhzhia: Polihraf. (in Ukrainian)
5. Skalozub, V., & Osovik, V. (2014). Individual intelligent models for operating a number of unified railway engineering systems based on the current state parameters. *Information and Control Systems at Railway Transport*, 6, 8-12. (in Russian)
6. Skalozub, V. V., Shvets, O. M., & Osovik, V. N. (2014). Methods of Intellectual Transport Systems in Tasks of Management by Parks of Objects of Railway Transport on Current Status. *Pytannia prykladnoi matematyky i matematychnoho modeliuвання*, 229-242. (in Russian)
7. Skalozub, V. V., & Klymenko, Y. V. (2016). Rozvytok protsedur analizu ta prohnozuvannia nedeterminovanykh tekhnoloho-ekonomichnykh protsesiv na osnovi pokaznykiv khaotychnoi dynamiky. *Economics: Time Realities*, 4(26), 82-90. (in Ukrainian)
8. Skalozub, V. V., Zhukovitskiy, I. V., Klimenko, I. V., & Zaets, A. P. (2018). Creation of Intellectual Decision Support Systems in a Unified Automated System for Managing Rail Freight in Ukraine. *Systemni tekhnolohii: Rehionalnyi mizhvuzivskiyi*, 3(116), 153-162. (in Russian)
9. Faggini, M., & Parziale, A. (2012). The Failure of Economic Theory. Lessons from Chaos Theory. *Modern Economy*, 03(01). doi: 10.4236/me.2012.31001 (in English)
10. Grabusts, P., Borisov, A., & Aleksejeva, L. (2015). Ontology-Based Classification System Development Methodology. *Information Technology and Management Science*, 18(1), 129-134. doi: 10.1515/itms-2015-0020 (in English)
11. Kohonen, T. (2001). *Self-Organizing Maps*. Berlin; Heidelberg: Springer. (in English)
12. Kazi, Z., Kazi, L., Radulovic, B., & Bhatt, M. (2016). Ontology-Based System for Conceptual Data Model Evaluation. *International Arab Journal of Information Technology*, 13(5), 542-551. (in English)
13. Piegat, A. (1998). Nonregular nonlinear sector modeling. *Applied Mathematics and Computer Science*, 8(3), 101-123. (in English)
14. Zhukovyts'kyi, I. (2017). Use of an automaton model for the designing of real-time information systems in the railway stations. *Transport problems*, 12(4), 101-108. (in English)

Надійшла до редколегії: 20.06.2018

Прийнята до друку: 03.10.2018