

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.42.083-047.58

Б. Е. БОДНАРЬ<sup>1</sup>, А. Б. ОЧКАСОВ<sup>2\*</sup>, Е. Б. БОДНАРЬ<sup>3</sup>, Т. С. ГРИШЕЧКИНА<sup>4</sup>,  
М. В. ОЧЕРЕТНЮК<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 01, эл. почта bodnarz@nz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

<sup>2\*</sup>Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, эл. почта abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

<sup>3</sup>Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, эл. почта Melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

<sup>4</sup>Каф. «Высшая математика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (0562) 36 26 04, эл. почта grishchekina.tatiana@gmail.com, ORCID 0000-0003-1570-4150

<sup>5</sup>Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, эл. почта ocheretniukmaksym@gmail.com, ORCID 0000-0002-9032-8602

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ РЕМОНТА ЛОКОМОТИВОВ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

**Цель.** В научной работе необходимо оценить влияние показателей эксплуатации и надежности локомотивов на систему организации их ремонта в депо с использованием методов теории массового обслуживания. **Методика.** В работе представлено описание цеха по ремонту локомотивов с помощью терминов и понятий системы массового обслуживания (СМО). Сформулированы задачи, решаемые при моделировании работы ремонтного цеха, приведен перечень исходных данных и результатов моделирования. В качестве программного средства моделирования использована графическая среда имитационного моделирования Simulink. **Результаты.** Установлено, что на основные показатели работы локомотивного депо влияет объем перевозок, надежность локомотивов, используемое правило отбора локомотивов из очереди, количество работающих ремонтных стоек. Разработанная модель ремонтного цеха депо позволяет рационально планировать использование оборудования, фонда рабочей силы, времени постановки локомотивов в ремонт с учетом равномерности загрузки цеха, а также усовершенствовать логистику поставок запасных частей. Эта модель в упрощенном виде описывает процесс выполнения ремонта парка магистральных тепловозов и может быть дополнена в зависимости от вида выполняемых в депо ремонтов. **Научная новизна.** В работе локомотиворемонтное депо представлено как объект системы массового обслуживания. Разработана имитационная модель локомотиворемонтного депо, которая позволяет проводить анализ влияния различных факторов на систему организации ремонта локомотивов в депо. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют определить влияние показателей эксплуатации и надежности локомотивов на организацию работы локомотиворемонтного депо. В дальнейших исследованиях разработанная модель может быть использована для усовершенствования системы организации ремонта на сети дорог при внедрении новых серий локомотивов и изменении стратегии их технического обслуживания.

**Ключевые слова:** цех ремонта локомотивов; моделирование; система массового обслуживания; организация работы ремонтного цеха

## Введение

Усовершенствование системы организации ремонта локомотивов является одним из способов снижения эксплуатационных затрат. Реструктуризация системы управления локомотивным хозяйством ПАО «Укрзалізниця» предполагает разделение функций эксплуатации и ремонта тягового подвижного состава. Такой подход уже используют на крупных предприятиях промышленного транспорта (металлургические заводы, горно-обогатительные комбинаты). Зарубежные железнодорожные компании (РЖД, Литовские железные дороги и др.) также выполнили разделение функций эксплуатации локомотивов и их ремонтов между локомотивными депо. На базе наиболее крупных депо выполняют ремонты локомотивов приписки не только этого, но и других депо. Другая часть депо выполняет только обслуживание локомотивов в процессе эксплуатации. На данном этапе в ПАО «Укрзалізниця» работают специализированные по сериям локомотивов и видам ремонта (ТР-2, ТР-3) локомотивные депо.

Разделение депо на эксплуатационные и ремонтные требует тщательной проработки, так как изменение программы ремонтов может привести к образованию очереди ожидающих ремонта локомотивов и, как следствие, увеличению их простоя. При использовании такого подхода, с одной стороны, возрастают затраты предприятия на извлечение локомотивов из эксплуатации и их транспортировку из эксплуатационного депо в ремонтное. С другой стороны, возможна слабая загрузка ремонтных предприятий, что связано с простаиванием ремонтных позиций в ожидании поступления локомотивов. Описанные ситуации в итоге приводят к увеличению расходов на содержание как локомотивов, так и технологического оборудования. Положительным является то, что создание специализированных депо сокращает капитальные затраты на организацию ремонта, повышает эффективность использования оборудования, производительность труда и, как следствие, качество ремонта. Задача распределения программы ремонтов между ремонтными депо на сети железных дорог и методика выбора специализированных депо является актуальной [7, 10, 16]. Решение поставленной задачи

предполагает разработку общей модели организации ремонта локомотивов на уровне не менее регионального филиала ПАО «Укрзалізниця». Частью такой модели является организация ремонта локомотивов на уровне ремонтного депо. Данная статья посвящена анализу методов и подходов к моделированию организации работы ремонтного локомотивного депо.

Исходными данными при моделировании организации ремонта в локомотивном депо является потребность в ремонте локомотивов. С точки зрения эксплуатирующей компании, это часть общей системы управления локомотивным парком. Для поддержания заданного уровня надежности локомотива транспортные компании используют определенную систему содержания. При этом на выбор такой системы влияют следующие факторы: характеристика ремонтного предприятия, род службы и условия эксплуатации, история эксплуатации каждого локомотива (электронный паспорт), уровень оснащенности и загрузки ремонтного предприятия, статистика отказов (надежность) узлов локомотива и локомотивов данной серии, а также ряд других.

На основании анализа существующих систем управления локомотивным парком [7, 12, 14, 19, 20] сформулированы основные задачи, которые необходимо решить при выборе системы содержания локомотивов с учетом технического состояния локомотивного парка и объема планируемых ремонтных работ. Среди них:

- разработка методики планирования загрузки ремонтных подразделений;
- разработка методики планирования материально-технического обеспечения ремонтных подразделений.

Решение поставленных задач также требует создания модели организации ремонта локомотивов в ремонтном депо с учетом планирования загрузки ремонтных подразделений, технического состояния локомотивного парка, объема выполняемых работ.

При разработке модели организации ремонта в локомотивном депо используют методы теории систем массового обслуживания [5, 7, 8, 11, 13], оптимизации [2, 4, 9, 15], теории экономико-математического моделирования [1, 4], анализа больших объемов данных и имитационного моделирования [18].

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Цель**

Выполнить анализ влияния показателей эксплуатации и надежности локомотивов на систему организации их ремонта в депо с использованием методов теории массового обслуживания.

**Методика**

Задачей планирования постановки локомотивов в ремонт является уменьшение простоя локомотивов в ремонте и в его ожидании, что в итоге существенно влияет на коэффициент готовности локомотива. При этом необходимо обеспечить равномерность загрузки ремонтных подразделений, возможность планирования поставки комплектующих и расходных материалов, а также обеспечить заданный уровень надежности локомотивного парка.

Существующая система планирования ремонтов основана на контроле межремонтных периодов. Она предусматривает определение потребности в ремонте или техническом обслуживании (ТО) путем сопоставления с нормативными значениями межремонтных пробегов локомотивов (прежде всего при их работе в поездах) или времени работы (например, при их использовании для маневровой или вывозной работы). Типичные нормативы межремонтных пробегов могут задаваться индивидуально для различных серий локомотивов.

Потребность в ремонте или ТО для отдельного локомотива фиксируется в случае, если его межремонтный пробег или время работы стали больше нормативных значений для соответствующего типа ремонта. При этом, согласно нормативным документам, для равномерности загрузки ремонтных цехов депо и локомотиворемонтных заводов предусматривается возможность регулирования межремонтных периодов (как правило, в пределах от  $-10$  до  $+ 25$  %). То есть фиксация потребности в ремонте или ТО происходит для определенного интервала значений межремонтного пробега или времени работы локомотива.

Текущие значения межремонтных пробегов или времени работы локомотивов определяют на основании учета их работы (путем обработки маршрутных листов машинистов). При этом, поскольку определение потребности в ремонте или ТО нужно выполнять на перспективу, ис-

пользуют прогнозирование изменения этих параметров. Прогнозирование осуществляют, как правило, исходя из их средних значений.

Планирование постановки локомотивов в ремонт может быть двух видов: по календарному времени и по пробегу. При планировании ремонта по календарному времени для установления планового дня постановки локомотива в ремонт исходят из среднесуточного пробега за истекший период или планового задания. Недостатком этого метода является то, что фактический суточный пробег локомотивов из-за различия их технического состояния, простоев в текущем ремонте, степени использования в работе и т. п. значительно отличается от планируемого. Более целесообразно планирование по пробегу, так как в этом случае локомотивы ставят в ремонт соответственно установленной периодичности. Недостатком этого метода планирования является возможная неравномерность выполнения суточного плана по обслуживанию. График обслуживания отдельного локомотива составляют на основании установленной периодичности технического обслуживания, ремонтного цикла и суточного пробега локомотива.

Рассмотренный подход используют в случае плано-предупредительной системы ремонта локомотивов. Однако его использование при внедрении комбинированной системы ремонта или с учетом технического состояния локомотивов не рационально, так как в этом случае объем ремонта и межремонтные интервалы определяют для каждого отдельного локомотива с учетом характеристик надежности его узлов.

Для оперативного планирования постановки локомотивов в ремонт нужно знать вероятность их пребывания в различных состояниях (эксплуатация, вид ремонта, простой в ожидании ремонта и др.). При решении этой задачи целесообразно использовать инструментальной теории массового обслуживания.

Рассмотрим подробнее возможность использования подходов теории массового обслуживания для моделирования процессов постановки локомотивов на ремонт и его выполнения, анализа загрузки ремонтных стойл и расчета их нужного количества.

В теории массового обслуживания используют методы теории вероятностей и математической статистики, она рассматривает теорети-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ческие основы рационального конструирования и эксплуатации систем массового обслуживания. Работа СМО заключается в выполнении поступающего потока заявок. Предметом теории массового обслуживания является установление зависимости между характером потока заявок, производительностью отдельных каналов, числом каналов и эффективностью обслуживания.

Характеристиками эффективности обслуживания могут выступать такие показатели:

- среднее время простоя отдельных каналов;
- среднее время ожидания в очереди;
- вероятность того, что поступившая заявка будет сразу принята к обслуживанию и др.

Данные характеристики описывают степень приспособленности системы к выполнению потока заявок, т. е. ее пропускную способность, под которой понимаем показатель среднего числа заявок, которое система может обслужить за единицу времени.

Требования в системе выполняют обслуживающие каналы. Классическая система массового обслуживания содержит от одного до бесконечного числа каналов.

В зависимости от наличия возможности ожидания начала обслуживания СМО подразделяют на:

- системы с потерями, в которых заявки, не нашедшие в момент поступления ни одного свободного обработчика, теряются;
- системы с ожиданием, которые имеют накопитель бесконечной ёмкости для буферизации поступивших требований, при этом ожидающие требования образуют очередь;
- системы с накопителем конечной ёмкости (с ожиданием и ограничениями), в которых длина очереди не может превышать ёмкости накопителя; при этом требование, поступающее в переполненную систему, в которой отсутствуют свободные места для ожидания, теряется.

Выбор заявки из очереди на обслуживание производят с помощью дисциплины обслуживания. Ее примерами являются: FIFO (пришедшего первым обслуживают первым), LIFO (пришедшего последним обслуживают первым), gandom (случайный выбор), SF (первыми обслуживают заявки с наименьшим временем обслуживания). В системах с ожиданием нако-

питель в общем случае может иметь сложную структуру. Система может быть одноканальной и многоканальной.

Для моделирования процессов ремонта локомотивного парка в условиях локомотивного депо подходит система с ожиданием, которая имеет накопитель бесконечной ёмкости для буферизации поступивших требований. При этом ожидающие локомотивы образуют очередь. Также в этом случае, с нашей точки зрения, уместнее всего использовать выбор требования из очереди по системе FIFO.

В данной системе средствами обслуживания (каналами) выступают ремонтные стойла, поток заявок представляет собой количество локомотивов, поступающих в систему обслуживания за определенное время: год, месяц, неделю, смену, час, минуту. Поток заявок служит основой для планирования производственной программы ремонтных стойл.

Из-за случайности входящего потока заявок и продолжительности их выполнения всегда имеется какое-то среднее число простаивающих локомотивов. Поэтому нужно так распределить число ремонтных стойл по различным подсистемам, чтобы простой и, следовательно, потери были минимальными. Отметим, что система массового обслуживания локомотивов представляет собой физическую систему  $S$  дискретного типа со счетным множеством состояний:

$$S_0, S_1, S_2, \dots, S_n, \dots$$

В любой момент времени  $t$  система  $S$  может находиться в одном из этих состояний. Тогда для любого  $t$ :

$$\sum_k p_k(t) = 1,$$

где  $p_k(t)$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, n, \dots$ ) – вероятность того, что в момент времени  $t$  система будет находиться в состоянии  $S_k$ .

Рассмотрим более детально ремонтный цех локомотивного депо, в котором выполняются все виды деповского ремонта, как систему массового обслуживания локомотивов.

Ремонтный цех с ремонтными стойлами, с точки зрения теории массового обслуживания, имеет следующие характеристики:

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

– являється розмкнutoю системою, так як джерело заявок знаходиться вне системи (депо експлуатації) и обладает их бесконечным числом;

– по характеру создания очереди является системой с ожиданием и бесконечной очередью. Дисциплина обслуживания без приоритета, система обслуживания может быть принята любая из ранее рассмотренных;

– по количеству каналов это многоканальная система с параллельным расположением каналов. В данной работе рассматриваем депо как систему с неоднородными каналами, так как при выполнении ремонта в депо используют специализированные по видам ремонта стойла (ТО-3, ТР-1 и т. д.)

Для ремонтного цеха как системы массового обслуживания основным фактором, обуславливающим протекающие в нем процессы, является

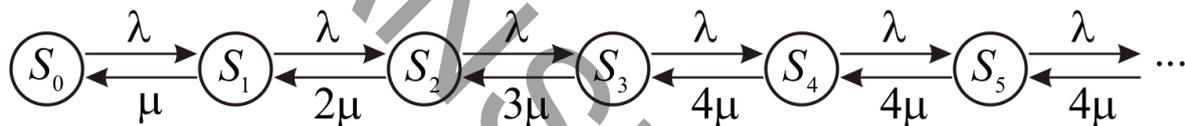


Рис. 1. Граф состояний цеха ремонта с  $n$  ремонтными позициями и ограниченной очередью

Введем следующие обозначения:

$i$  – количество секций локомотивов (заявок) в системе обслуживания (в очереди и на обслуживании);  $\lambda_i$  – интенсивность поступления в систему секций при условии, что в системе уже находится  $i$  секций;  $\mu_i$  – интенсивность выходного потока обслуженных секций при условии, что в системе находится  $i$  секций;  $p_i$  – вероятность того, что в системе находится  $i$  секций;  $\rho$  – сводная интенсивность загрузки стойла (или интенсивность загрузки канала).

Цех ремонта локомотивов может принимать одно из состояний:

$S_0$  – все позиции свободны;  $S_1$  – одна позиция занята, остальные  $n-1$  свободны;

$S_2$  – две позиции заняты, остальные  $n-2$  свободны;  $S_n$  – все позиции заняты, очереди нет;

$S_{n+1}$  – все позиции заняты, в очереди находится один локомотив (секция);  $S_{n+m}$  – все позиции заняты, в очереди  $m$  локомотивов (секций).

Следует обратить внимание на то, что в данной системе интенсивность потока обслужи-

вания с увеличением количества заявок от 0 до  $n$  увеличится от  $\mu$  до  $n\mu$ . Соответственно увеличивается количество каналов обслуживания. При количестве требований, превышающих  $n$ , интенсивность обслуживания остается равной  $n\mu$ .

При моделировании нужно решить следующие задачи: моделирование работы ремонтного цеха на протяжении заданного количества часов; определение вероятностей состояний  $S_0 \dots S_{n+m}$  ремонтного цеха; определение среднего числа заявок (локомотивов) в очереди на обслуживание; определение среднего числа заявок на обслуживание; определение среднего числа заявок в системе; определение средней продолжительности пребывания заявки в очереди; определение средней продолжительности пребывания заявки в системе; определение относительной пропускной способности системы; определение абсолютной пропускной способности системы.

Для вероятностей  $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$  система линейных дифференциальных уравнений (уравнения Эрланга) будет:

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$\begin{aligned}
 \frac{dp_0}{dt} &= -\lambda p_0 + \mu p_1; \\
 \frac{dp_1}{dt} &= -\lambda p_1 - \mu p_1 + \lambda p_0 + 2\mu p_2; \\
 \frac{dp_2}{dt} &= -\lambda p_2 - 2\mu p_2 + \lambda p_1 + 3\mu p_3; \\
 \frac{dp_3}{dt} &= -\lambda p_3 - 3\mu p_3 + \lambda p_2 + 4\mu p_4; \\
 \frac{dp_4}{dt} &= -\lambda p_4 - 4\mu p_4 + \lambda p_3 + 4\mu p_5; \\
 \frac{dp_5}{dt} &= -\lambda p_5 - 4\mu p_5 + \lambda p_4 + 4\mu p_6. \quad (1)
 \end{aligned}$$

В установившемся (стационарном) состоянии (при  $t \rightarrow \infty$ ) система уравнений принимает вид:

$$\begin{aligned}
 \lambda p_0 &= \mu p_1; \\
 \lambda p_1 &= 2\mu p_2; \\
 \lambda p_2 &= 3\mu p_3; \\
 \lambda p_3 &= 4\mu p_4; \\
 \lambda p_4 &= 4\mu p_5. \quad (2)
 \end{aligned}$$

Добавляем нормирующее условие:

$$\sum_{i=0}^{\infty} p_i = 1. \quad (3)$$

Смысл его в том, что в любой момент времени цех обязательно должен находиться в одном из своих состояний (простой, работает, работает и очередь есть).

Исходными данными для моделирования работы ремонтного цеха являются: количество ремонтных позиций; время моделирования; интенсивность входящего потока заявок (с учетом плановых и внеплановых ремонтов); длительность обслуживания на каждой ремонтной позиции для каждого вида ремонта.

В результате моделирования определяются следующие показатели СМО (цеха ремонта локомотивов): вероятности состояний системы  $S_0 \dots S_{n+m}$ ; среднее число заявок (локомотивов) в очереди на обслуживание; среднее число заявок в системе; средняя продолжительность пребывания заявки в очереди; средняя продол-

жительность пребывания заявки в системе. Результаты моделирования работы ремонтного цеха за заданное время включают количество поступивших заявок и количество часов, потраченных на обслуживание.

Для определения вероятностей нахождения СМО в одном из возможных состояний используем формулы 4–6:

$$p_0 = \left( 1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} \cdot \frac{1}{(n-\rho)} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$p_k = \frac{\rho^k}{k!} p_0, \quad (k=1..n), \quad (5)$$

где  $k$  – количество занятых стоек;

$$p_{n+i} = \frac{\rho^{n+i}}{n^i \cdot n!} p_0, \quad (i=5,6,\dots) \quad (6)$$

Вероятность образования очереди определяем по формуле:

$$p_q = \frac{\rho^n}{n!} \cdot \frac{n}{n-\rho} \cdot p_0. \quad (7)$$

Среднее число заявок в очереди:

$$L_q = \frac{\rho^{n+1}}{n!} \cdot \frac{n}{(n-\rho)^2} \cdot p_0 \quad (8)$$

Среднее число обслуживаемых заявок:

$$L_{ser} = \rho = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (9)$$

Среднее время пребывания заявки в СМО:

$$\bar{t}_{QS} = \frac{L_q}{\lambda} + \frac{Q}{\mu}, \quad (10)$$

где  $Q$  – относительная пропускная способность СМО (в нашем случае она равна единице).

Среднее время пребывания в очереди:

$$\bar{t}_q = \frac{L_q}{\lambda}. \quad (11)$$

## Результаты

Для исследования влияния системы содержания, организации эксплуатации и ремонта локомотивов, а также уровня их надежности разработана модель и выполнено моделирова-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ние работы цеха ремонта магистральных тепловозов в ремонтном депо. При моделировании принято выполнение в ремонтном цехе всех видов депоовского ремонта тепловозов ТО-3, ТР-1, ТР-3 и внеплановые ремонты. При организации обслуживания заявок (моделировании ремонта локомотивов) принята специализация ремонтных стоек по видам ремонта. Предусмотрено две группы ремонтных стоек. Внеплановые ремонты и ремонты в объеме ТР-3 выполняют в одной группе, ТР-1 и ТО-3 выполняют в другой группе ремонтных стоек.

В качестве программного средства моделирования использована графическая среда имитационного моделирования Simulink.

Структурная схема модели ремонтного цеха локомотивного депо представлена на рис. 2.

Блоки 1 и 2 случайным образом формируют

распределенные во времени заявки на ремонт тепловозов. Блок 3 случайным образом формирует время выполнения ремонта. Расчет количества заявок и времени обслуживания тепловозов выполнен в соответствии с действующей нормативной документацией. При

этом допускается отклонение времени поступления в ремонт  $\pm 20\%$  от нормы. В качестве ремонтных стоек депо в модели использован блок 4 «ремонтная позиция». Время, необходимое для выполнения соответствующего вида ремонта, определяется этим блоком в зависимости от вида ремонта  $\pm 20\%$ . В качестве дисциплины обслуживания заявок принята дисциплина FIFO. Очередь тепловозов в ожидании ремонта организована блоком 5.

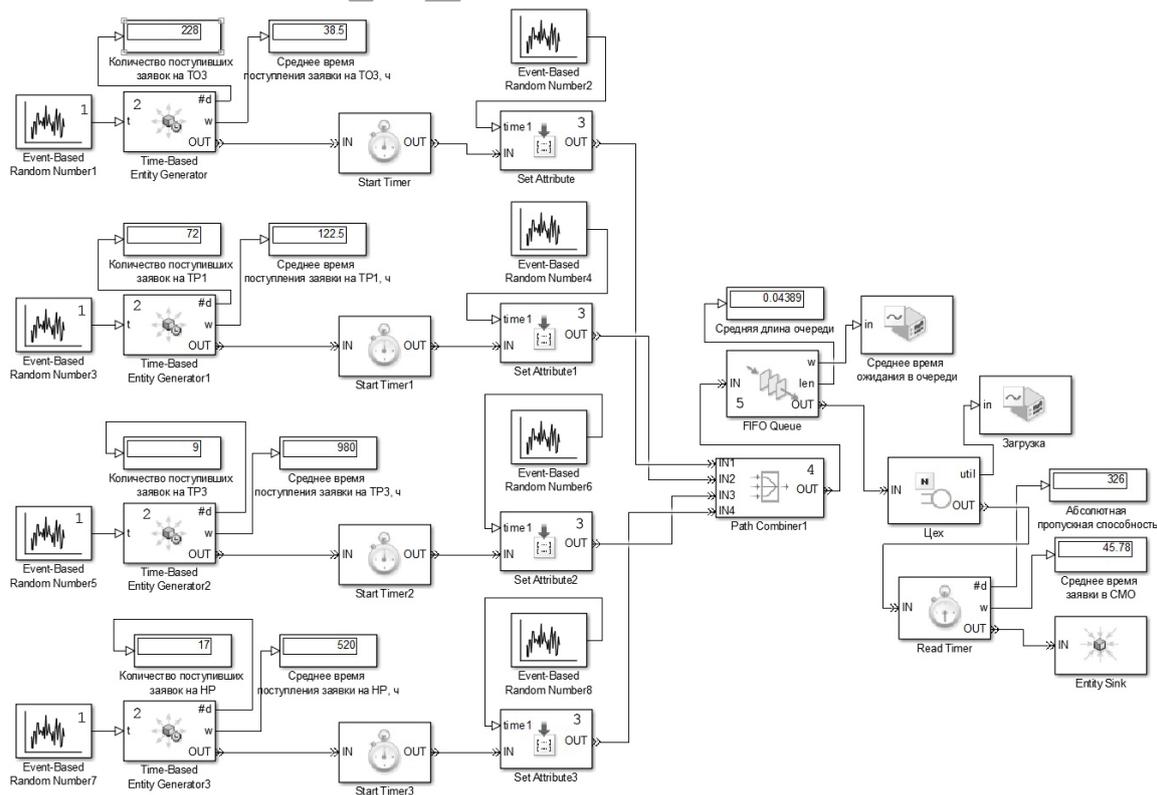


Рис. 2. Модель цеха ремонта тепловозов в виде СМО:

1 – формирователь времени поступления тепловозов в ремонт;

2 – блок формирования распределения заявок во времени;

3 – формирователь времени обслуживания тепловозов на ремонтной позиции;

4 – позиции ремонта тепловозов; 5 – очередь тепловозов в ожидании ремонта

Выполнено моделирование ремонтного цеха для приписного парка  $N=18$  тепловозов (36 секций) серии 2ТЭ116. Среднесуточный пробег

тепловозов принят  $l=500$ , время моделирования 365 суток, доля внеплановых ремонтов 5%. Результаты моделирования приведены в табл. 1–3.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В табл. 1 приведені результати моделювання при різному кількості ремонтних стійл. Як видно з отриманих результатів,

при прийнятих вихідних даних використання трьох ремонтних стійл найбільш раціонально, при цьому завантаження цеху депо становить 0,6 %.

Таблиця 1

**Результати моделювання роботи цеху ремонту тепловозів при зміні числа ремонтних стійл**

Кількість ремонтних стійл, шт.	Середнє час очікування в череді, ч	Середня довжина череди, сек.	Завантаження цеху/депо, %	Середнє час заявки в СМО, ч
2	60	1,439	0,88	83,18
3	1,5	0,044	0,59	45,78
4	0	0	0,45	44,6

В табл. 2 приведені результати моделювання при використанні в депо трьох ремонтних стійл і зміні середньодобового пробігу тепловозів від 400 до 700 км/сутки. Як видно з отриманих результатів, збільшення середньодобового пробігу призводить до збільшення завантаження ремонтного цеху до 0,79 %, при цьому довжина череди зростає в 10 разів, а середнє час очікування – в 5,6 разів. Це пояснюється тим, що з збільшенням середньодобового

пробігу зростає кількість заявок на виконання ремонту.

В табл. 3 приведені результати моделювання при використанні в депо трьох ремонтних стійл і зміні кількості внепланових ремонтів від 5 до 10 %. Отримані результати показують, що збільшення частоти внепланових ремонтів призводить до незначительного збільшення завантаження ремонтного цеху, при цьому довжина череди і середнє час очікування також змінюються незначительно.

Таблиця 2

**Результати моделювання роботи цеху ремонту при зміні середньодобового пробігу тепловозів**

Середньодобовий пробіг локомотива, км	Середнє час очікування в череді, ч	Середня довжина череди, лок	Завантаження цеху/депо, %	Середнє час заявки в СМО, ч
400	0,8	0,02	0,48	44,94
500	1,5	0,04	0,59	45,78
600	2,1	0,08	0,68	45,58
700	4,5	0,22	0,79	48,22

Таблиця 3

**Результати моделювання роботи цеху ремонту тепловозів при зміні частоти внепланових ремонтів**

Частота внепланових ремонтів локомотивів, %	Середньодобовий пробіг локомотива, км	Середнє час очікування в череді, ч	Середня довжина череди, лок	Завантаження цеху/депо, %	Середнє час заявки в СМО, ч
5	500	1,4	0,032	0,57	44,3
8	500	1,5	0,044	0,59	45,78
10	500	1,5	0,048	0,6	46,68

### Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна работы заключается в представлении локомотиворемонтного депо как объекта системы массового обслуживания. Разработана имитационная модель локомотиворемонтного депо, которая позволяет проводить анализ влияния различных факторов на систему организации ремонта локомотивов в депо.

Использование разработанной модели и результатов моделирования позволяет определить влияние показателей эксплуатации и надежности локомотивов на организацию работы локомотиворемонтного депо. В дальнейших исследованиях предложенная модель может быть использована для усовершенствования системы организации ремонта на сети дорог при внедрении новых серий локомотивов и изменении стратегии их технического обслуживания.

### Выводы

В работе представлено описание цеха по ремонту локомотивов с использованием терминов и понятий системы массового обслуживания. Сформулированы задачи для моделирования работы ремонтного цеха, приведен перечень исходных данных и результаты моделиро-

вания. На основании анализа результатов моделирования можно осуществлять оптимизацию структуры ремонтного цеха и необходимого количества персонала, исходя из объема перевозок, показателей надежности локомотивов, используемого правила отбора локомотивов из очереди, количества работающих ремонтных стоил и т. д. Установлено, что перечисленные параметры влияют на основные показатели работы локомотиворемонтного депо. Предложенные модели ремонтного цеха позволяют рационально планировать использование оборудования, фонда рабочей силы, времени постановки локомотивов в ремонт с учетом равномерности загрузки цеха, а также дают возможность усовершенствовать логистику поставок запасных частей. Модель в упрощенном виде описывает процесс выполнения ремонта парка магистральных тепловозов и может быть дополнена в зависимости от вида ремонтов, выполняемых в депо.

Требует дальнейшей разработки вопрос учета показателей надежности при моделировании поступления локомотивов во внеплановые виды ремонта, определения вероятностей перехода локомотива из одного состояния в другое, а также учета показателей надежности при определении объемов ремонтных работ.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Берестовой, А. М. Моделирование системы технического обслуживания и ремонта локомотивов / А. М. Берестовой, А. А. Лямзин // Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту. Серія: Технічні науки : зб. наук. пр. – Маріуполь, 2003. – Вип. 13. – С. 276–280.
2. Босов, А. А. Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог : монография / А. А. Босов, П. А. Лоза. – Днепропетровск : Дриант, 2015. – 252 с.
3. Гришечкіна, Т. С. Побудова математичної моделі раціональної системи утримання технічних об'єктів залізничного транспорту / Т. С. Гришечкіна // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2017. – Вип. 14. – С. 30–35. doi: 10.15802/tstt2017/123165
4. Гурьева, А. Г. Основы моделирования процессов технического обслуживания локомотивов / А. Г. Гурьева, Н. Б. Чернецкая-Белецкая // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2015. – № 1 (218). – С. 262–265.
5. Зіненко, О. Л. Підвищення ефективності використання локомотивного парку шляхом вдосконалення управління експлуатаційною роботою : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20 / Зіненко Ольга Леонідівна ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – 200 с.
6. Исследование процесса эксплуатации и ремонта электровозов с использованием инструментов BIG DATA и имитационного моделирования / А. В. Скребков, А. А. Воробьев, А. Г. Ламкин, Д. И. Бодриков // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – № 4. – С. 190–198.
7. Кудаяров, М. М. Выбор оптимальной организации ремонта локомотивов на полигоне железной дороги / М. М. Кудаяров // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. – 2012. – № 3 (32). – С. 99–103.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

8. Кудаяров, М. М. Оптимизация системы технологического процесса ремонта тягового подвижного состава / М. М. Кудаяров, И. С. Цихалевский // Современные проблемы транспортного комплекса России : межвуз. сб. науч. тр. молодых ученых, магистрантов и аспирантов. – Магнитогорск, 2012. – Вып. 2. – С. 14–22.
9. Лоза, П. А. Оценка качества выполнения системы содержания парка электроподвижного состава / П. А. Лоза, Т. С. Гришечкина // Электрификация транспорту. – 2015. – № 9. – С. 87–93.
10. Методика и алгоритм оптимального распределения локомотивов по ремонтным предприятиям / А. В. Горский, А. В. Скребков, Т. О. Чигамбаев, И. С. Цихалевский // Транспорт Урала. – 2008. – № 3 (18). – С. 25–27.
11. Моделювання процесу оперативного планування роботи локомотивного парку і локомотивних бригад / І. В. Жуковицький, В. В. Скалосуб, О. В. Ветрова, О. Л. Зіненко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 12. – С. 74–78.
12. Моделювання зміни коефіцієнту технічного використання маневрового тепловозу для різних систем утримання / А. П. Фалендиш, А. Л. Сумцов, О. В. Артеменко, О. В. Клецька // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 1/3 (79). – С. 24–31. doi: 10.15587/1729-4061.2016.60640
13. Очкасов, А. Б. Подходы к моделированию системы технического обслуживания локомотивов / О. Б. Очкасов, Т. С. Гришечкина, М. В. Очеретнюк // Актуальні проблеми автоматизації та управління : тези доп. V міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. молодих учених і аспірантів (Луцьк, 28–30 бер. 2017 р.) / Луцьк. нац. техн. ун-т, НУ «Львівська політехніка», Київ. нац. ун-т харчових технологій, Нац. гірн. ун-т, Херсон. нац. техн. ун-т, Люблінська політехніка. – Луцьк, 2017. – № 5. – С. 99–104.
14. Сумцов, А. Л. Удосконалення методів та моделей визначення системи технічної експлуатації модернізованих маневрових тепловозів : дис. ... канд. тех. наук : 05.22.07 / Сумцов Андрій Леонідович ; Укр. держ. ун-т залізн. трансп. – Харків, 2017. – 165 с.
15. Шантаренко, С. Г. Моделирование процессов технического обслуживания локомотивов / С. Г. Шантаренко // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2005. – Т. 308, № 5. – С. 169–171.
16. Bodnar, B. Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways / B. Bodnar, A. Ochkasov, D. Bobyr // Technologijos ir Menas = Technology and Art. – 2016. – № 7. – P. 109–114.
17. Bodnar, B. System Choice of the Technical Maintenance of Locomotives Equipped with on-Board Diagnostic Systems / B. Bodnar, O. Ochkasov // Transport Means : Proc. of 21st Intern. Sci. Conf. (Sept. 20–22, 2017) / Kaunas University of Technology, Klaipėda University. – Juodkrante, Kaunas, Lithuania. – 2017. – Pt. I. – P. 43–47.
18. Development of an Integrated Model for the Evaluation and Planning of Railroad Track Maintenance / Alexander H. Lovett, C. Tyler Dick, Conrad Ruppert, M. Rapik Saat, Christopher Barkan // Proc. of the 2013 Joint Rail Conf. (Apr. 15–18, 2013, Knoxville, Tennessee, USA). – Knoxville, 2013. doi: 10.1115/jrc2013-2407
19. Ochkasov, O. Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives / O. Ochkasov, O. Shvets, L. Černiauskaitė // Technologijos ir Menas = Technology and Art. – 2017. – № 8. – P. 68–71.
20. Wu, J. Study on Adjustment Evaluation of Locomotive Affair Productivity Layout / Jun Wu, Hua Fei Jia // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 401–403. – P. 2120–2126. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.401-403.2120

Б. Є. БОДНАР<sup>1</sup>, О. Б. ОЧКАСОВ<sup>2\*</sup>, Є. Б. БОДНАР<sup>3</sup>, Т. С. ГРИШЕЧКИНА<sup>4</sup>,  
М. В. ОЧЕРЕТНЮК<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 01, ел. пошта bodnarz@nz.dit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

<sup>2\*</sup>Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

<sup>3</sup>Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта Melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

<sup>4</sup>Каф. «Вища математика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна, тел. +38 (0562) 36 26 04, ел. пошта grischechkina.tatiana@gmail.com, ORCID 0000-0003-1570-4150

<sup>5</sup>Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта ocheretniukmaksym@gmail.com, ORCID 0000-0002-9032-8602

## МОДЕЛЮВАННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ РЕМОНТУ ЛОКОМОТИВІВ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ СИСТЕМ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

**Мета.** У науковій роботі необхідно оцінити вплив показників експлуатації та надійності локомотивів на систему організації їх ремонту в депо з використанням методів теорії масового обслуговування. **Методика.** У роботі представлено опис цеху з ремонту локомотивів за допомогою термінів і понять системи масового обслуговування (СМО). Сформульовано завдання, які вирішуються при моделюванні роботи ремонтного цеху, наведено перелік вихідних даних і результатів моделювання. У якості програмного засобу моделювання використане графічне середовище імітаційного моделювання Simulink. **Результати.** Встановлено, що на основні показники роботи локомотивного депо впливає обсяг перевезень, надійність локомотивів, що використовуються, правило відбору локомотивів із черги, кількість працюючих ремонтних стійл. Розроблена модель ремонтного цеху депо дозволяє раціонально планувати використання обладнання, фонду робочої сили, часу постановки локомотивів у ремонт із урахуванням рівномірності завантаження цеху, а також удосконалити логістику поставок запасних частин. Ця модель у спрощеному вигляді описує процес виконання ремонту парку магістральних тепловозів і може бути доповнена в залежності від виду виконуваних у депо ремонтів. **Наукова новизна.** У роботі локомотиворемонтне депо представлено як об'єкт системи масового обслуговування. Розроблено імітаційну модель локомотиворемонтного депо, яка дозволяє проводити аналіз впливу різних чинників на систему організації ремонту локомотивів у депо. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють визначити вплив показників експлуатації та надійності локомотивів на організацію роботи локомотиворемонтного депо. У подальших дослідженнях розроблена модель може бути використана для удосконалення системи організації ремонту на мережі доріг при впровадженні нових серій локомотивів та зміні стратегії їх технічного обслуговування.

*Ключові слова:* цех ремонту локомотивів; моделювання; система масового обслуговування; організація роботи ремонтного цеху

V. E. BODNAR<sup>1</sup>, O. B. OCHKASOV<sup>2\*</sup>, E. B. BODNAR<sup>3</sup>, T. S. HRYSHECHKINA<sup>4</sup>, M. V. OCHERETNYUK<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 01, e-mail bodnarz@nz.dit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

<sup>2\*</sup>Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 61, e-mail abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

<sup>3</sup>Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 61, e-mail Melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

<sup>4</sup>Dep. «Higher Mathematics», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 36 26 04, e-mail grischechkina.tatiana@gmail.com, ORCID 0000-0003-1570-4150

<sup>5</sup>Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 61, e-mail ocheretniukmaksym@gmail.com, ORCID 0000-0002-9032-8602

## SIMULATION OF LOCOMOTIVE REPAIR ORGANIZATION BY THE METHODS OF QUEUE SYSTEMS THEORY

**Purpose.** The article is aimed to evaluate the influence of locomotives` operation and reliability indicators on the system of locomotives repair organization in depot, using the methods of queue theory. **Methodology.** The article describes the locomotive repair workshop using the terms and concepts of the queue systems theory (QST). The tasks solved during simulation of the repair workshop operation are formulated, the list of initial data and simulation results is given. A graphical simulation environment Simulink was used as a software simulation tool. **Findings.** It was established that the main indicators of locomotive depot operation are affected by the volume of traffic, the reli-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ability of locomotives, the rule used to select locomotives from the queue, the number of operating repair bays. The developed model of the depot repair workshop will make possible rational planning of the repair workshop's equipment use, the human capital, the time of putting the locomotives into repair taking into account the workshop loading uniformity, as well as to improve the repair parts supply logistics. This model in a simplified form describes the repair process of the main diesel locomotive fleet, and can be supplemented depending on the repair type performed in the depot. **Originality.** The paper presents the locomotive repair depot as an object of the queue systems theory. The simulation model of the locomotive repair depot was developed. It allows analyzing the influence of various factors on the system of locomotives' repair organization in the depot. **Practical value.** The obtained results make it possible to determine the influence of locomotives' operation and reliability indicators on the organization of the locomotive repair depot operation. In further studies, the developed model can be used to improve the system of repair organization on the railway network when introducing new series of locomotives and changing the strategy of their maintenance.

**Keywords:** locomotive repair workshop; simulation; queue system theory; organization of the repair workshop operation

## REFERENCES

1. Berestovoy, A. M., & Lyamzin, A. A. (2003). Modelirovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lokomotivov. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*, 13, 276-280. (in Russian)
2. Bosov, A. A., & Loza, P. A. (2015). *Teoreticheskie osnovy ratsionalnogo sodержaniya podvizhnogo sostava zheleznikh dorog: monografiya*. Dnepropetrovsk: Driant. (in Russian)
3. Hryshechkina, T. S. (2017). Mathematical Model of the Rational Maintenance System of Railway Transport Technical Objects. *Transport Systems and Transportation Technologies. Collection of Scientific Works of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician Lazaryan*, 14, 30-35. doi: 10.15802/tstt2017/123165 (in Ukrainian)
4. Hureva, A. H., & Chernetskaia-Beletskaia, N. B. (2015). Fundamentals of Modeling of Processes of Maintenance of Locomotives. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 1(218), 262-265. (in Russian)
5. Zinenko, O. L. (2010). *Pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia lokomotyvnoho parku shliakhom vdoskonalennia upravlinnia ekspluatatsiinoiu robotoiu*. (Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk). Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipropetrovsk. (in Ukrainian)
6. Skrebkov, A. V., Vorobiyov, A. A., Lamkyn, A. G., & Bodrikov, D. I. (2017). The Study of Running and Maintenance Process of Electric Locomotives with Big Data and Simulation Modeling Tools. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy*, 4, 190-198. (in Russian)
7. Kudayarov, M. M. (2012). Vybory optimalnoy organizatsii remonta lokomotivov na poligone zheleznoy dorogi *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*, 3(32), 99-103. (in Russian)
8. Kudayarov, M. M. (2012). Optimizatsiya sistemy tekhnologicheskogo protsessa remonta tyagovogo podvizhnogo sostava. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii*, 2, 14-22. (in Russian)
9. Loza, P. A., & Hryshechkyna, T. S. (2015). Estimation of the quality of implementation electric rolling stock maintenance system. *Elektryfikatsiia transportu*, 9, 87-93. (in Russian)
10. Gorskiy, A. V., Skrebkov, A. V., Chigambaev, T. O., & Tsikhalevskiy, I. S. (2008). Methods and Algorithm of Optimum Sending of Locomotives to Repair Enterprises. *Transport Urala*, 3(18), 25-27. (in Russian)
11. Zhukovytskyi, I. V., Skalozub, V. V., Vietrova, O. V., & Zinenko, O. L. (2006). Modeliuvannia protsesu operativnoho planuvannia roboty lokomotyvnoho parku i lokomotyvnykh bryhad. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*, 12, 74-78. (in Ukrainian)
12. Falendysh, A. P., Sumtsov, A. L., Artemenko, O. V., & Kletska, O. V. (2016). Simulation of changes in the steady state availability factor of shunting locomotives for various maintenance systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/3(79), 24-21. doi: 10.15587/1729-4061.2016.6064040 (in Ukrainian)
13. Ochkasov, O. B., Hryshechkina, T. S., & Ocheretnyuk, M. V. (2017). Approaches to the system simulation of maintenance operations for locomotives. *Aktualni problemy avtomatyzatsii ta upravlinnia : tezy dopovidei V mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii molodykh uchenykh i aspirantiv (Lutsk, 28–30 bereznia 2017 r.)*, 5, 99-104. (in Russian)

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

14. Sumtsov, A. L. (2017). *Udoskonalennia metodiv ta modelei vyznachennia systemy tekhnichnoi ekspluatatsii modernizovanykh manevrovykh teplovoziv*. (Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk). Ukrainyski derzhavnyi universytet zaliznychnoho transport, Kharkiv. (in Ukrainian)
15. Shantarenko, S. G. (2005). Modelirovanie protsessov tekhnicheskogo obsluzhivaniya lokomotivov. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universitetata. Inzhiniring georesursov*, 308(5), 169-171. (in Russian)
16. Bodnar, B., Ochkasov, A. & Bobyr, D. (2016). Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways. *Technologijos ir Menas = Technology and Art*, 7, 109-114. (in English)
17. Bodnar, B., & Ochkasov, O. (2017). System Choice of the Technical Maintenance of Locomotives Equipped with on-Board Diagnostic Systems. *Transport Means: Proceedings of 21st International Science Conference (Sept. 20–22, 2017)*. Juodkrante, Kaunas, Lithuania, Pt. I, 43-47. (in English)
18. Lovett, A. H., Dick, C. T., Ruppert, C., Saat, M. R., & Barkan, C. (2013). Development of an Integrated Model for the Evaluation and Planning of Railroad Track Maintenance. *2013 Joint Rail Conference*. doi: 10.1115/jrc2013-2407 (in English)
19. Ochkasov, O., Shvets, O., & Černiauskaitė, L. (2017). Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives. *Technologijos ir Menas = Technology and Art*, 8, 68-71. (in English)
20. Wu, Jun, & Jia, Hua Fei (2013). Study on Adjustment Evaluation of Locomotive Affair Productivity Layout. *Applied Mechanics and Materials*, 401-403, 2120-2126. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.401-403.2120 (in English)

Надійшла до редколегії: 20.06.2018

Прийнята до друку: 03.10.2018