

# Моделирование систем технического обслуживания объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта на основе теории массового обслуживания

А. Н. ШАБЕЛЬНИКОВ<sup>1</sup>, Ю. В. ШАПОВАЛОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС», Ростовский филиал), Ростов-на-Дону, 344038, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), Ростов-на-Дону, 344038, Россия

**Аннотация.** Обоснована необходимость внедрения в практику перевозочного процесса механизма прогнозируемого технического обслуживания объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Функции мониторинга объектов, диагностики их состояния и динамики изменения предлагается реализовывать в рамках специально созданной системы поддержки принятия решений. В рамках этого инструментария построена и проанализирована математическая модель синтеза систем технического обслуживания объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Методика анализа объектов инфраструктуры содержит процедуру структурирования исследуемого объекта железнодорожного транспорта в виде совокупности систем и сетей массового обслуживания. Рассмотрены особенности применения разрабатываемой модели для решения трех практических задач: технического и коммерческого осмотра составов в парке приема сортировочной станции, выявления и исправления дефектов колесных пар по тепловым аномалиям, разработки системы диагностирования отрицательной динамики грузовых вагонов.

**Ключевые слова:** объекты инфраструктуры железнодорожного транспорта; мониторинг; диагностика; техническое обслуживание; теория массового обслуживания

**В**ведение. Железнодорожный транспорт ведет сложную, многоаспектную деятельность, оказывая населению, экономике страны транспортные услуги. Ее исследование требует использования различных модельных конструкций: графовых моделей, моделей запасов, линейного и нелинейного программирования, временных рядов и др. Таким образом, отраслевую деятельность можно моделировать и с позиции теории массового обслуживания (ТМО) [1, 2, 3], рассматривая отдельные ее составляющие как системы массового обслуживания (СМО) [4, 5, 6]. Действительно, практика исследования процессов на железнодорожном транспорте дает несколько соответствующих тому примеров [7, 8, 9, 10]. Это:

- обслуживание грузов в грузовом терминале станции;
- обслуживание пассажиров: у турникетов, у билетных касс, в точках общественного питания и пр.;

■ E-mail: [Meldis@mail.ru](mailto:Meldis@mail.ru) (Ю.В. Шаповалова)

- прием и обслуживание поездов на станции, отцепов при роспуске составов на горках сортировочных станций и т. д.

В рамках данного исследования актуализируется новый класс задач, решение которых основывается на применении ТМО. Новизна состоит в том, что объектами обслуживания являются не составы, вагоны, грузы и т. д., а информационные сообщения. Это организация технического обслуживания объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ): вагонов, отцепов, составов и других подвижных единиц на пунктах технического обслуживания (ПТО) и иных выделенных для этой цели площадках.

В зависимости от сущности задачи объекты, поступающие на обслуживание в ТМО, называются клиентами, или заявками. ПТО называются каналами. Каналы обслуживания объединяются в СМО.

Разрабатываемая методика анализа объектов инфраструктуры основана на прогнозируемом техобслуживании, что обеспечивает рост всех показателей транспортного процесса: качество предоставляемых услуг, безопасность перевозочного процесса, его экономические показатели, живучесть исполнительных систем. Указанная методика анализа реализуется в рамках системы поддержки принятия решений (СППР) соответствующей сферы деятельности (см. примеры на рисунках) и включает в себя:

- представление исследуемого объекта железнодорожного транспорта в виде совокупности СМО и сети массового обслуживания (СеМО);
- анализ параметров отдельных СМО;
- анализ информационных потоков в СеМО.

## Примеры моделирования процессов на основе ТМО

*1. Организация технического обслуживания составов в парке приема.* Железнодорожная отрасль переживает в настоящее время период реструктуризации, целью которой является переход к рыночным условиям хозяйствования (приоритетный учет экономических

критериев, повышение конкурентоспособности и эффективности как отрасли в целом, так и ее отдельных предприятий в частности). К сожалению, указанный процесс осуществляется, как правило, интуитивно, без должного обоснования проводимых мероприятий.

Сортировочные станции и иные предприятия железнодорожного транспорта не являются в этом ряду исключением, и руководству приходится балансировать между двумя взаимно противоположными тенденциями — сокращением расходов (например, персонала) ради повышения экономической эффективности своей работы и их увеличением с целью обеспечения заданного уровня качества и безопасности обслуживания.

Роспуск составов на сортировочных горках сопровождается техническим обслуживанием и коммерческим осмотром составов поездов. При этом устраняются выявленные неисправности вагонов, несоответствия в сопроводительных документах. То есть весь роспуск существенным образом зависит от эффективности технического обслуживания и коммерческого осмотра вагонов.

*2. Выявление и исправление дефектов колесных пар.* Выявление температурных аномалий в проходящих грузовых поездах, которые являются следствием разрегулированной тормозной рычажной передачи, неполного отпуска тормозов, отключенных тормозов и других неисправностей тормозного оборудования, осуществляется комплексом тепловой диагностики «АСТЕКО-01» [11].

В работе [11] описана технология измерения и анализа аномалий и не представлены:

- механизм взаимодействия каналов обслуживания (измерение тепловых параметров колесных дисков, диагностика аномалий, исправление повреждений);
- модель анализа и оптимизации параметров процесса взаимодействия каналов исследуемой системы обслуживания.

*3. Диагностирование отрицательной динамики грузовых вагонов.* Современные системы диагностирования отрицательной динамики грузовых вагонов позволяют выявлять колебания кузовов подвижных единиц в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В работе [12] представлены схемы расположения датчиков расстояния от отдельных частей вагона и описание соответствующей системы диагностики, с помощью которой осуществляется оценка динамических характеристик исследуемых подвижных единиц.

Применение в качестве регистрирующего устройства лазерного 2D-сканера позволяет выявлять колебания кузовов подвижных единиц и в горизонтальной, и в вертикальной плоскостях. В [12] приведен алгоритм учета опасных значений колебаний при галопировании подвижных единиц и дифференциро-

вания их в зависимости от конструктивных особенностей и дефектов кузовов вагонов.

Представленный ниже материал позволит «до-строить» СППР по диагностике динамики движения и ремонту подвижных единиц на железнодорожном транспорте.

**Роль и место СППР в деятельности ПТО.** ПТО может содержать несколько каналов обслуживания, называемых в ТМО «каналами» [4, 7]. На рис. 1 представлены схемы ПТО из одного (а) и двух (б) каналов обслуживания ( $O$  и  $O_1$ ,  $O_2$  соответственно). Обе схемы содержат общие каналы  $\Pi$  (прием объекта на обслуживание) и  $Z$  (оформление документов, сдача обслуженного объекта).

ПТО — это системы массового обслуживания, и они характеризуются традиционными показателями: интенсивностью входного и выходного потоков, коэффициентом обмена, длиной очереди на обслуживание, средним временем нахождения в системе и др. [6, 8].

Информация о работе каналов вводится в СППР, в которой и рассчитываются указанные выше параметры информационных потоков. Следующая задача СППР — оптимизировать работу системы управления предприятием (ПТО в том числе), которая решается на основе применения некоторых формальных моделей ТМО.

Традиционно в ТМО используются следующие потоки событий: простейший (пуассоновский), Пальма, Эрланга первого, второго и т. д. порядков. Относительно них и разработаны в теории основные модели обслуживания. Таким образом, для адекватного моделирования в первую очередь необходимо идентифицировать поток требований в систему обслуживания [4, 7].

Наибольшего распространения в ТМО получили модели, использующие простейший (пуассоновский) поток. К свойствам этого потока относятся [4, 7]: отсутствие последействия, ординарность, стационарность.

Для всех трех представленных выше для исследования задач первые два свойства выполняются. Третье выполняется на ограниченных промежутках времени (для сортировочных процессов, по крайней мере для каждого роспуска составов).

Таким образом, можно утверждать, что простейший поток является удовлетворительной моделью потоков в рассматриваемых примерах.

**Оптимизация СМО.** Реструктуризацию СМО, осуществляющих техобслуживание, рекомендуется проводить двумя способами: изменением числа каналов обслуживания и изменением числа фаз обслуживания.

Для этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. По всем исследуемым процессам определить по статистическим данным законы распределения входных и выходных потоков.

2. Вычислить основные характеристики системы обслуживания (коэффициент обмена системы, длина очереди заявок на обслуживание, среднее время обслуживания, среднее время нахождения заявки в очереди, число необслуженных заявок и т. д.).

3. Рассчитать значения выходных критериев работы системы: показатели безопасности и живучести, производственные показатели, экономическая оценка системы обслуживания.

Основная задача ТМО состоит в нахождении приемлемого компромисса между двумя требованиями: минимизировать длину очереди заявок и обеспечить полную загрузку обслуживающего персонала (оборудования). Они взаимно противоречивы, так как чем больше персонала (технических средств) задействуется, тем меньше очередь и загрузка каждого «устройства». (Под устройством понимают как ПТО, так и специалистов.)

В [6] для экономической оценки системы управления предприятием вводится критерий: минимум суммарных издержек организации в единицу времени  $C$ , которые задаются формулой (1).

$$C = C_1 + C_2, \quad (1)$$

где  $C_1$  — потери от увеличения интенсивности обслуживания (путем расширения штата при увеличении числа каналов обслуживания и/или привлечения более опытного специалиста);  $C_2$  — потери от простоя клиентов на обслуживании.

Потери организации в зависимости от интенсивности выходного потока приведены на рис. 2.

При  $C_1 < C_2$  — потеря клиента обходится для организации дороже, чем затраты на содержание канала обслуживания. Если  $C_1 > C_2$  — собственные расходы на персонал и оборудование, обеспечивающие работу канала, превышают затраты от потери клиента.

Очевидно, что  $C_1$  пропорционально  $\mu$ , поэтому

$$C_1 = a\mu, \quad (2)$$

где  $a$  — нормированная стоимость единицы интенсивности обслуживания;  $\mu$  — интенсивность выходного потока.

Согласно [5] среднее число требований (клиентов) в системе равно

$$n_s = \lambda / (\mu - \lambda). \quad (3)$$

Тогда

$$C_2 = b n_s = b \lambda / (\mu - \lambda), \quad (4)$$

где  $b$  — стоимость единицы времени простоя клиента, руб. (у нас у. е. — условных единиц, приведенных к величине потерь, связанных с обслуживанием канала, — приняты за 1);  $\lambda$  — интенсивность входного потока.

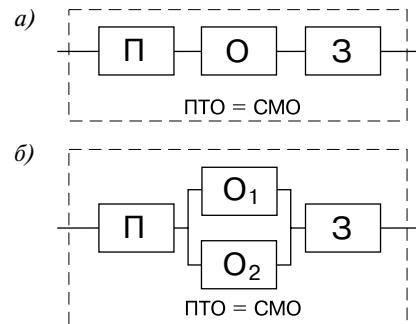


Fig. 1. Schemes of queuing systems:  
 $a$  — MS with one service channel;  $b$  — MS with two service channels;  
П — reception of the object for maintenance; З — registration of documents, delivery of the served object; О — service channel

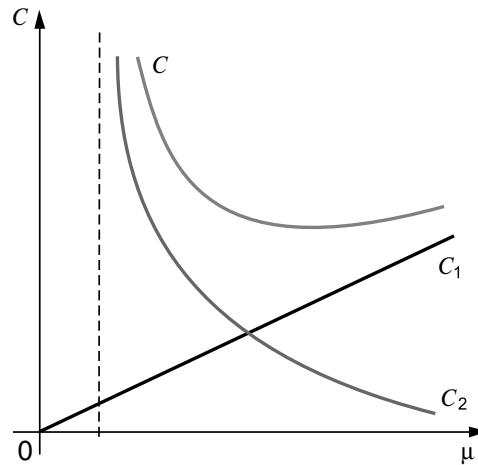


Рис. 2. Потери организации в зависимости от интенсивности выходного потока:  
 $\lambda$  — интенсивность входного потока;  $\mu$  — интенсивность выходного потока;  $C_1$  — потери от увеличения интенсивности обслуживания;  $C_2$  — потери от простоя клиентов;  $C$  — суммарные потери

Fig. 2. Organization's loss depending on the intensity of the output flow:  
 $\lambda$  — intensity of the input stream;  $\mu$  — intensity of the output flow;  
 $C_1$  — losses from increasing the intensity of service;  $C_2$  — losses from idle customers;  $C$  — total losses

Учитывая (1) и (2), имеем:

$$C(\mu) = a\mu + b \frac{\lambda}{\mu - \lambda}. \quad (5)$$

Найдем оптимальное значение интенсивности выходного потока  $\mu_{\text{опт}}$ , минимизирующее общие потери организации:

$$J = \min_{\mu} C. \quad (6)$$

После несложных преобразований получим:

$$\mu_{\text{опт}} = \lambda + (b\lambda / a)^{0.5}. \quad (7)$$

*Пример.* Пусть специалисты, способные обслуживать один канал клиентов (например, составы в парке приема), равны по своим профессиональным качествам и обеспечивают одинаковую заданную интенсивность обслуживания канала  $\mu_3 = 4$  состава/ч. Интенсивность входного потока  $\lambda = 3$  состава/ч. Пусть также отношение стоимости простого клиента к стоимости интенсивности обслуживания равно 3, т. е.  $b/a = 3$ . Необходимо определить, используя выражение (6):

- $\mu_{\text{опт}}$ , при которой будет достигнут минимум критерия общих потерь организации;
- наиболее рациональную структуру обслуживания клиентов.

Получаем  $\mu_{\text{опт}} = 6$  составов/ч. При этом минимальные потери  $C(6) = 2,6$  у. е. Для данных величин  $\mu_3$  и  $\mu_{\text{опт}}$  одноканальная структура СМО (рис. 1, *а*) является недостаточной, двухканальная (рис. 1, *б*) – избыточной.

Просчитаем по формуле (5) экономические характеристики этих систем  $C(4) = 3,4$  у. е., а  $C(8) = 3,56$  у. е. Следовательно, если выбирать по экономическому критерию, то несколько выгоднее иметь один канал обслуживания. Можно рекомендовать при этой структуре ПТО повысить производительность канала. Этот эффект может быть достигнут повышением квалификации работающих специалистов и/или внедрением технико-технологических инноваций. Например, если в результате этих мероприятий производительность труда повысится на 20 %, то издержки на техническое обслуживание составят  $C(5) = 2,9$  у. е., что почти на 15 % меньше исходных затрат  $C(4)$ . Это приблизит нас к оптимальному решению.

**Описание комплекса мониторинга, диагностики и технического обслуживания объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.** Выше представлен математический инструментарий анализа и управления техническим обслуживанием. Рассмотрим теперь соответствующую сеть СМО, описывающую мониторинг,

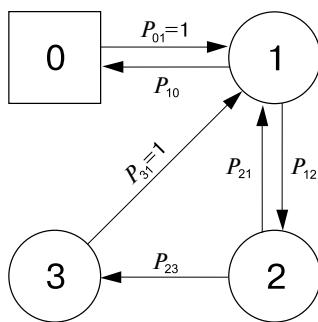


Рис. 3. СeМО: блок 0 – источник заявок; блок 1 – подсистема мониторинга; блок 2 – подсистема диагностики; блок 3 – подсистема технического обслуживания;  $P_{ij}$  – вероятности перехода заявки из подсистемы  $i$  в подсистему  $j$  ( $i, j = 0, 1, 2, 3$ )

Fig. 3. Queuing network: block 0 – source of applications; block 1 – monitoring subsystem; block 2 – diagnostic subsystem; block 3 – maintenance subsystem;  $P_{ij}$  – the probability of the submission of the application from the subsystem  $i$  to the subsystem  $j$  ( $i, j = 0, 1, 2, 3$ )

диагностику и техническое обслуживание объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта [6].

В качестве иллюстративного примера (рис. 3) возьмем технико-технологический комплекс, включающий некоторый технологический процесс – источник заявок (блок 0), его подсистему мониторинга (блок 1), подсистему диагностики (блок 2) и подсистему технического обслуживания (блок 3). Исследуемый технологический процесс и блоки (1–3) СМО образуют СeМО.

Рассматривать будем стационарный, установившийся процесс, характеризующийся постоянными вероятностями перехода из одного состояния в другое, которые в этом случае можно определить по результатам наблюдений за процессом [13].

Математической моделью СeМО является матрица вида (8). Она включает  $K+1$  строк и  $K+1$  столбцов (по числу элементов СeМО: число  $K$  соответствует количеству СМО в СeМО). Здесь  $P_{ij}$  – вероятности перехода заявки из  $i$ -й подсистемы в подсистему  $j$  ( $i, j = 0, 1, \dots, K$ ). При этом  $P_{0j}$  – вероятности поступления заявок из источника, а  $P_{j0}$  – вероятности покидания подсистемы СМО ( $j = 0$ ). Эта матрица называется *матрицей передач сетей*:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & P_{01} & \dots & P_{0K} \\ P_{10} & P_{11} & \dots & P_{1K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{K0} & P_{K1} & \dots & P_{KK} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

В такой матрице принято считать, что  $P_{00} = 0$ , объясняя это тем, что «предположение  $P_{00} \neq 0$  не представляет практического интереса» [5] (имеются в виду заявки, циркулирующие в источнике заявок). Матрица передач стохастическая и удовлетворяет требованиям:

$$\sum_{j=0}^K P_{ij} = 1, \quad 0 \leq P_{ij} \leq 1, \quad i = 0, 1, \dots, K.$$

В рассматриваемом примере процесс развивается следующим образом:

- Из источника заявка попадает в подсистему мониторинга с вероятностью  $P_{01} = 1$ . Это случай, при котором мониторингу подвергаются все операции процесса. Если мониторинг осуществляется выборочно, то  $P_{01} < 1$ .

- Результаты мониторинга передаются в подсистему диагностики, если нарушены значения проверяемых параметров процесса (с вероятностью  $P_{12}$ ). Если мониторинг нарушений не выявил, то в источник заявок идет подтверждение о нормальном прохождении процесса ( $P_{10}$ ). Очевидно, что  $P_{12} + P_{10} = 1$ .

- Если подсистема диагностики выявила причину несоответствия установленных параметров процесса, то заявка передается в подсистему технического обслуживания с вероятностью  $P_{23}$ . Если ей недостаточно данных, то заявка передается обратно в подсистему

мониторинга (с вероятностью  $P_{21}$ ). Также выполняется равенство:  $P_{21} + P_{23} = 1$ .

• Из подсистемы технического обслуживания все заявки передаются в подсистему мониторинга для проверки, т. е.  $P_{31} = 1$ .

Следовательно, для нашего примера матрица передач (8) имеет следующий вид:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ P_{10} & 0 & P_{12} & 0 \\ 0 & P_{21} & 0 & P_{23} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Определим интенсивности потоков требований в каждой системе. Интенсивность входного потока подсистемы  $\lambda_j$  равна сумме интенсивностей выходных потоков от других систем. При этом следует учитывать повторное обслуживание подсистемой одной и той же заявки. Таким образом,

$$\lambda_j = \sum_{i=0}^K \lambda_i P_{ij}, \quad j = 0, \dots, K, \quad (10)$$

где  $\lambda_0$  — интенсивность источника заявок.

Система  $K+1$  уравнений (10) с  $K+1$  неизвестными  $\lambda_j$  является однородной. Это значит, что ее ранг не выше  $K$  [14]. Действительно, если сложить все уравнения (10) между собой, то получим очевидное тождество. Следовательно, одно из неизвестных системы уравнений можно считать свободным. В качестве зависимого выберем первое уравнение, а в качестве свободной переменной естественно выбрать внешнее воздействие на СeМО —  $\lambda_0$ . Далее для удобства введем следующие обозначения:

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K); \quad P_0 = (P_{01}, P_{02}, \dots, P_{0K});$$

$$P_1 = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1K} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{K1} & P_{K2} & \dots & P_{KK} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Исключим первое, зависимое уравнение из системы (10). Тогда с учетом введенных обозначений (11) можно записать систему (10) следующим образом:

$$\lambda = \lambda P_1 + \lambda_0 P_0.$$

Сгруппируем в левой части члены, содержащие искомый вектор  $\lambda$ :

$$\lambda = (E_K - P_1) \lambda_0 P_0.$$

В последнем выражении через  $E_K$  обозначена единичная матрица  $K$ -го порядка.

Решим полученное матричное уравнение методом обратной матрицы, умножив обе части предыдущего уравнения на  $(E_K - P_1)^{-1}$  [14]:

$$\lambda = \lambda_0 P_0 (E_K - P_1)^{-1}. \quad (12)$$

В (12) введем обозначение:

$$\alpha = P_0 (E_K - P_1)^{-1} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K). \quad (13)$$

Теперь компоненты вектора  $\lambda$  можно записать в виде:

$$\lambda_i = \alpha_i \lambda_0, \quad i = 1, \dots, K. \quad (14)$$

Общее время нахождения заявки в СeМО  $t_{\text{CeMO}}$  является взвешенной суммой с теми же коэффициентами, что и общая интенсивность  $\lambda_0$  [6]. То есть она распределяется между подсистемами СeМО с долями  $\alpha_i$ . Следовательно,

$$t_{\text{CeMO}} = \sum_{i=1}^K \alpha_i \bar{t}_i. \quad (15)$$

Здесь обозначено среднее время нахождения заявки в  $i$ -й СМО системы через  $\bar{t}_i$ .

Рассмотрим числовой пример СeМО, представленной на рис. 3. Пусть для этой системы статистическим путем были получены следующие параметры:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 0,6; \quad P_{10} = 0,9; \quad P_{12} = 0,1; \\ P_{21} &= 0,1; \quad P_{23} = 0,9. \end{aligned} \quad (16)$$

Тогда согласно (9), (11) и (16) имеем:

$$P_0 = (1, 0, 0); \quad P_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0,1 & 0 \\ 0,1 & 0 & 0,9 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

По (13) определим вектор

$$\alpha = (10/9; 1/9; 1/10). \quad (18)$$

Отсюда в соответствие с (14) и (16) имеем:

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (2/3; 1/15; 3/50). \quad (19)$$

Легко проверить, что для (9) и (19) выполняется условие (10), что свидетельствует о верности проведенных расчетов.

Если дополнительно известны промежутки времени нахождения заявок в подсистемах СМО данного технико-технологического комплекса (в подсистеме мониторинга  $t_1' = 0,06$  мин, в подсистеме диагностики  $t_2' = 0,6$  мин, на техобслуживании  $t_3' = 50$  мин), то среднее время нахождения заявки в СeМО согласно (15) и (18) будет равно 3,08 мин.

Представленные выше модели описывают экономические (например, потери от организации обслуживания клиентов) и производственные (время нахождение клиента на обслуживании) показатели

работы предприятий железнодорожного транспорта. Кроме этих критериев, можно сформулировать и иные: полученный экономический эффект, рентабельность производства и др. Выбор критерия в СППР диктуется конкретными условиями реализации перевозочного процесса и является прерогативой менеджмента системы. В общем, может быть сформулирована многокритериальная задача, акцентирующая роль каждого показателя.

**Заключение.** 1. Задача анализа и синтеза структуры и функций технического обслуживания объектов транспортной инфраструктуры на сегодняшний очень актуальна: успешность перевозочного процесса зависит от своевременности и качества технического обслуживания. Предлагаемый инструментарий позволяет реализовать техническое обслуживание объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта по состоянию, обеспечивая экономическую и производственную эффективность.

2. Предложенная методика анализа функционирования ПТО объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта базируется на математических моделях ТМО, представляя ПТО как СМО, а процедуру мониторинга, диагностики и технического обслуживания в виде сети массового обслуживания.

3. Синтезирована сеть массового обслуживания, включающая источник заявок (в нашем случае — перевозочный процесс) и две подсистемы: диагностики и ПТО. Подсистема диагностики рассматривается как составная часть СППР, а ПТО как СМО. Предложена математическая модель, позволяющая рассчитать основные параметры сети: интенсивность выходного потока, время обслуживания и время нахождения в сети.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивченко Г. И., Каштанов В. А., Коваленко И. Н. Теория массового обслуживания: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1982. 256 с.
2. Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003. 512 с.
3. Лябах Н. Н., Бутакова М. А. Системы массового обслуживания: развитие теории, методология моделирования и синтеза. Ростов н/Д: ЮНЦ РАН: РГУПС, 2004. 200 с.
4. Многокритериальная оптимизация транспортных систем массового обслуживания / В. Балыников [и др.] // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 6. С. 73–76.
5. Бутырин О. В., Бутырина Ю. О., Тирских В. В. Математическое моделирование процесса перевозок пригородного железнодорожного транспорта // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12-5. С. 776–779.
6. Марков Д. С., Яковлев В. А., Соколов В. Б. Определение загрузки станций и узлов Петербургского метрополитена в экспертной системе // Автоматика и телемеханика железных дорог России. Техника, технология, сертификация: сб. науч. тр. СПб.: ПГУПС, 2009. С. 45–50.
7. Поттгоф Г. Теория массового обслуживания: пер. с нем. / под ред. Е. П. Нестерова. М.: Транспорт, 1979. 144 с.
8. Вишневецкий Д. Г. Применение методов теории массового обслуживания для оптимизации работы сортировочных станций: сб. работ лауреатов конкурса молодых ученых. Ростов н/Д: СКНЦ ВШ, 1998. С. 73–84.
9. Общий курс железных дорог / Ю. И. Ефименко [и др.]. М.: Академия, 2005. 256 с.
10. Железнодорожный транспорт: на пути к интеллектуальному управлению / С. Е. Аладуров [и др.]. Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, 2010. 322 с.
11. Шаповалов В. В., Пустовой Ю. Е., Шаповалова Ю. В. Комплекс тепловой диагностики «АСТЕКО-01». Методы анализа тепловых аномалий тормозного оборудования грузовых вагонов // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2015». Ч. 2. Естественные и технические науки. Ростов н/Д: РГУПС, 2015. С. 290–292.
12. Шаповалов В. В., Пустовой Ю. Е., Шаповалова Ю. В. Особенности построения сети передачи данных системы обнаружения отрицательной динамики грузовых вагонов на СКжд // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2012». Ч. 1. Естественные и технические науки. Ростов н/Д: РГУПС, 2012. С. 126–127.
13. Лябах Н. Н., Шабельников А. Н. Техническая кибернетика на железнодорожном транспорте: учеб. Ростов н/Д: СКНЦ ВШ: РГУПС, 2002. 283 с.
14. Шафаревич И. Р., Ремизов А. О. Линейная алгебра и геометрия. М.: Физматлит, 2009. 511 с.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**ШАБЕЛЬНИКОВ Александр Николаевич,**  
д-р техн. наук, профессор, директор Ростовского филиала  
АО «НИИАС»

**ШАПОВАЛОВА Юлия Владимировна,**  
старший преподаватель, кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», ФГБОУ ВО РГУПС

Статья поступила в редакцию 15.12.2017 г., актуализирована 27.03.2018 г., принятая к публикации 10.04.2018 г.

## Modeling of maintenance systems for railway infrastructure facilities based on the theory of mass service

**A. N. SHABEL'NIKOV<sup>1</sup>, Yu. V. SHAPOVALOVA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Joint Stock Company "Research and Design Institute of Information Technology, Signalling and Telecommunication in Railway Transport" (JSC "NIIAS", Rostov branch), Rostov-on-Don, 344038, Russia

<sup>2</sup>Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Rostov State Transport University" (FGBOU VO RGUPS), Rostov-on-Don, 344038, Russia

**Abstract.** The article is substantiated the necessity of introducing the mechanism of predictable maintenance of railway transport infrastructure into the practice of the transportation process. The functions of object monitoring, diagnostics of their condition

and dynamics of change are proposed to be implemented within the framework of a specially created decision support system. It was also proposed to use the mathematical apparatus of queuing theory to implement the tasks of analyzing and synthesizing the

structure and functions of the system for organizing maintenance of transport infrastructure facilities. Within the framework of this tool, a mathematical model for the synthesis of maintenance systems for railway infrastructure facilities was constructed and analyzed, and a network of queuing systems describing monitoring, diagnostics and maintenance of these facilities was considered. The analysis technique of the infrastructure objects includes the procedure for structuring the railway transport object in the form of a combination of queuing systems and queuing networks, analysis of their parameters, analysis and optimization of information flows in queuing networks. The features of the application of the developed model for the solution of three practical problems are analyzed: technical and commercial inspection of trains at the sorting station reception, identification and correction of wheelset defects on thermal anomalies, development of a system for diagnosing the negative dynamics of freight cars.

A model is described that allows calculating the main parameters (service intensity, service time and location in network) for a network that includes the source of applications (the transportation process), the diagnostic subsystems (as part of the decision support system — DSS) and the maintenance depots.

**Keywords:** objects of the railway transport infrastructure; monitoring; diagnostics; maintenance; queuing theory

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-165-171>

## REFERENCES

1. Ivchenko G. I., Kashtanov V. A., Kovalenko I. N. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya*. Ucheb. posobie dlya vuzov [Queuing Theory. A tutorial for Universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982, 256 p.
2. Vishnevetskiy V. M. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya komp'yuternykh setey* [Theoretical foundations of computer network design]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2003, 512 p.
3. Lyabakh N. N., Butakova M. A. *Sistemy massovogo obsluzhivaniya: razvitiye teorii, metodologiya modelirovaniya i sinteza* [Queuing systems: theory development, methodology of modeling and synthesis]. Rostov-on-Don, UNTs RAS, RGUPS Publ., 2004, 200 p.
4. Balyasnikov V. V., Bogdanov A. A., Maslakov V. P., Staroselets V. G. *Mnogokriterial'naya optimizatsiya transportnykh sistem massovogo obsluzhivaniya* [Multicriteria optimization of transport systems of mass service]. Transport Rossiyskoy Federatsii, 2012, no. 6, pp. 73–76.
5. Butyrin O. V., Butyrina Yu. O., Tirsikh V. V. *Matematicheskoe modelirovaniye protessa perevozok prigorodnogo zheleznodorozhnogo transporta* [Mathematical modeling of the process of transportation of suburban railway transport]. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii [International Journal of applied and fundamental research], 2015, no. 12-5, pp. 776–779.
6. Markov D. S., Yakovlev V. A., Sokolov V. B. *Opredelenie zagruzki stantsiy i uzlov Peterburgskogo metropolitena v eksperimentnoi sisteme* [Determining the load of stations and nodes of the St. Petersburg subway in the expert system]. Avtomatika i telemekhanika zheleznykh dorog Rossii. Tekhnika, tekhnologiya, sertifikatsiya. Sb.
7. Pottgoff G., Nesterov E. P. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queuing Theory]. Moscow, Transport Publ., 1979, 144 p.
8. Vishnevetskiy D. G. *Primenenie metodov teorii massovogo obsluzhivaniya dlya optimizatsii raboty sortirovочных stantsiy*. Sb. rabot laureatov konkursa molodykh uchenykh [Application of methods of queuing theory for optimizing the work of marshalling yards. Proc. of works by laureates of the contest of young scientists]. Rostov-on-Don, SKNTs VSh Publ., 1998, pp. 73–84.
9. Efimenko Yu. I., Uzdin M. M., Kovalev V. I. et al. *Obshchii kurs zheleznykh dorog* [General Course of Railways]. Moscow, Akademiya Publ., 2005, 256 p.
10. Adadurov S. E., Gapanovich V. A., Lyabakh N. I., Shabel'nikov A. N. *Zheleznodorozhnyy transport: na puti k intellektual'nому upravleniyu* [Railway transport: on the way to intellectual management]. Rostov-on-Don, UNTs RAS Publ., 2010, 322 p.
11. Shapovalov V. V., Pustovoy Yu. E., Shapovalova Yu. V. *Kompleks teplovoy diagnostiki "ASTEKO-01". Metody analiza teplovoy anomalii tormoznogo oborudovaniya gruzovykh vagonov* [Complex of thermal diagnostics "ASTEKO-01". Methods for analyzing thermal anomalies in the brake equipment of freight cars]. Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Transport-2015". Ch. 2. Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Transport-2015". Part 2. Natural and technical sciences]. Rostov-on-Don, RGUPS Publ., 2015, pp. 290–292.
12. Shapovalov V. V., Pustovoy Yu. E., Shapovalova Yu. V. *Osobennosti postroeniya seti peredachi dannykh sistemy obnaruzheniya otritsatel'noy dinamiki gruzovykh vagonov na SKzhd* [Features of building a data transmission network of the system for detecting the negative dynamics of freight cars on the SKzhd railways]. Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Transport-2012". Ch. 1. Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Transport-2012". Part 1. Natural and technical sciences]. Rostov-on-Don, RGUPS Publ., 2012, pp. 126–127.
13. Lyabakh N. N., Shabel'nikov A. N. *Tekhnicheskaya kibernetika na zheleznodorozhnom transporte*. Ucheb. [Technical Cybernetics in Railway Transport. A Textbook]. Rostov-on-Don, SKNTs VSh, RGUPS Publ., 2002, 283 p.
14. Shafarevich I. R., Remizov A. O. *Lineynaya algebra i geometriya* [Linear algebra and geometry]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 511 p.

## ABOUT THE AUTHORS

### Aleksander N. SHABEL'NIKOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Rostov branch of JSC "NIIAS"

### Yuliya V. SHAPOVALOVA,

Senior Lecturer, Department "Automation and telemechanics in railway transport", FGBU VO RGUPS

Received 15.12.2017

Revised 27.03.2018

Accepted 10.04.2018

## ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

сами расходования горюче-смазочных материалов тягового подвижного состава, а также может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: [rio@vniizht.ru](mailto:rio@vniizht.ru), [www.vniizht.ru](http://www.vniizht.ru).

E-mail: [Meldis@mail.ru](mailto:Meldis@mail.ru) (Yu. V. Shapovalova)

Антохин Г. Г., Поварков И. Л. Совершенствование учета расхода моторного масла тепловозами. Ногинск: АНАЛИТИКА РОДИС, 2016. 101 с.

Обоснованы направления совершенствования учета расхода моторного масла тепловозами и разработаны методические подходы к его реализации.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников железнодорожной отрасли, занимающихся вопро-