

## Транспорт

УДК 629.4.083

DOI: 10.30987/article\_5b5063da64eac2.47177627

Д.Г. Евсеев, М.Ю. Куликов, А.С. Кузютин

### СЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ СЕРВИСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Разработана структура сетевой модели технологии работы железнодорожных станций и вагоноремонтных предприятий при сервисном техническом обслуживании грузовых вагонов.

**Ключевые слова:** грузовые вагоны, технологический процесс, сервисное обслуживание, теория массового обслуживания, сетевая модель.

D.G. Evseev, M.Yu. Kulikov, A.S. Kuzyutin

### NETWORK MODEL OF FRIGHT CAR MAINTENANCE WORKS

The purpose of this work is a creation of a network model of a technological system for freight car servicing and its parameter definition.

As methods of investigations there is used a mathematical apparatus of the probability theory, networks of mass servicing and random processes.

As a result of this investigation is a structure development of a network model of a function technology of railway stations and car-repair plants at technical servicing freight cars and also a formation of prere-

quisites for the further investigation of transport-technological complexes.

The developed network model of a technological system of a railway station and a car-repair plant function will allow systemizing the work of a car-repair plant and transport infra-structural objects cooperating with it.

**Key words:** freight cars, engineering procedure, maintenance, theory of mass servicing, network model.

#### Введение

Транспортно-технологические комплексы железных дорог, к которым относятся инфраструктура и подвижной состав, при теоретическом исследовании их структуры и характера функционирования можно смоделировать. Моделирование выполняется для выявления причинно-следственных связей между параметрами и характеристиками исследуемого комплекса.

Технология моделирования предполагает создание абстрактных объектов (моделей), которые можно представить в виде математических выражений, используя терминологию определенной научной теории. Применение математического аппарата выбранной теории позволит рассчитать характеристики в зависимости от параметров объекта исследования.

Исследование объектов транспортно-технологических комплексов железных дорог, которым присущ вероятностный (стохастический) характер функциониро-

вания, можно выполнить на основе методов теории вероятностей [1] и одного из её направлений – теории массового обслуживания (ТМО). Моделирование, выполненное на основе данных научных теорий, способно отразить структуру и организацию функционирования объектов исследования.

Теоретические исследования транспортно-технологических комплексов железных дорог с вероятностным характером функционирования можно выполнить на основе математических моделей массового обслуживания (ММО) и теории случайных процессов. При этом исследуемые объекты железнодорожного транспорта можно представить в виде *систем* (СМО) или *сетей* (СеМО), применяя математический аппарат и терминологию ТМО или теории сетей массового обслуживания (ТСеМО).

ТСеМО является сравнительно новым и быстро развивающимся разделом ТМО, и её математический аппарат при-

влекает все большее внимание исследователей, о чем могут свидетельствовать опубликованные обзор [2] и справочник [3] отечественных и зарубежных ученых.

Само понятие СеМО было введено американским математиком Джеймсом Р. Джексоном [4], который, в свою очередь, опирался на работу по многофазным системам Р. Джексона [5]. В литературе по ТМО СеМО часто называют «сеть Джексона» или «джексоновская сеть», а возможность её расчета устанавливает теорема Джексона, т.е. уравнения движения входящих потоков, описывающие среднюю скорость прибытия, которая позволяет определить скорость входящих потоков в отдельных узлах.

ТСеМО представлена терминологией, удобной для адекватного описания функционирования транспортно-технологического комплекса, поскольку в терминах этой теории можно формализовать достаточно сложную модель.

Масштабные исследования на железнодорожном транспорте с применением методов ТМО проводились во второй половине прошлого века отечественными [1;

6; 7] и зарубежными [8; 9] учеными (в основном на многофазных СМО).

Ранняя работа авторов [10] также опиралась на методологию и научный подход ученых прошлого века. Однако развитие и внедрение информационных технологий на железнодорожном транспорте позволяет выполнить исследования транспортно-технологического комплекса на качественно новом уровне.

Предпосылкой создания настоящей работы послужили современные публикации [11; 12] по использованию методов ТМО в вычислительных системах.

Реальная действительность диктует свои правила, и в этой связи авторы, опираясь на современный теоретический опыт в области ТМО, а также возможность использовать информационные технологии и вычислительные системы, продолжают свое исследование по модернизации созданной ими ранее концептуальной модели [10] и формируют новый подход к данной технологии. Результат проделанной работы и предлагается в настоящей статье, освещающей современный взгляд на дальнейшее исследование данной темы.

**Сеть массового обслуживания грузовых вагонов**

Совокупность взаимосвязанных систем МО грузовых вагонов (ГВ) можно объединить в *сеть* (СеМО ГВ). На рис. 1

представлена структура абстрактной сети массового обслуживания грузовых вагонов.

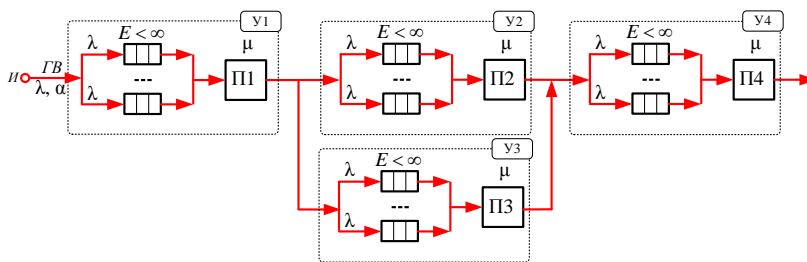


Рис. 1. Абстрактная сеть массового обслуживания грузовых вагонов

Основными элементами СеМО ГВ являются её узлы – У ( $У1...Уn$ ), представляющие собой взаимосвязанные СМО ГВ, и источники образования вагонов, которым необходимо СТО, – И.

Для упрощения сеть на рис. 1 можно представить в виде ориентированного графа СеМО ГВ, вершины которого соответствуют узлам, а ребра отображают пе-

ремещение вагонов между ними. Схема ориентированного графа абстрактной СеМО ГВ приводится на рис. 2.

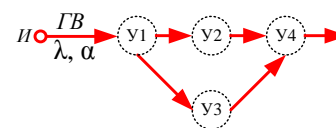


Рис. 2. Граф абстрактной СеМО ГВ

Перестановку вагонов между узлами СеМО ГВ в общем случае можем задать в виде матрицы *вероятностей перемещений*  $P = [p_{ij} | i, j = 0, 1, \dots, n]$ . Путь движения вагонов в сети назовем *маршрутом*.

В зависимости от структуры и свойств исследуемого технологического комплекса его моделью может быть СеМО ГВ различного уровня. Структурная схема классификации СеМО ГВ приводится на рис. 3.

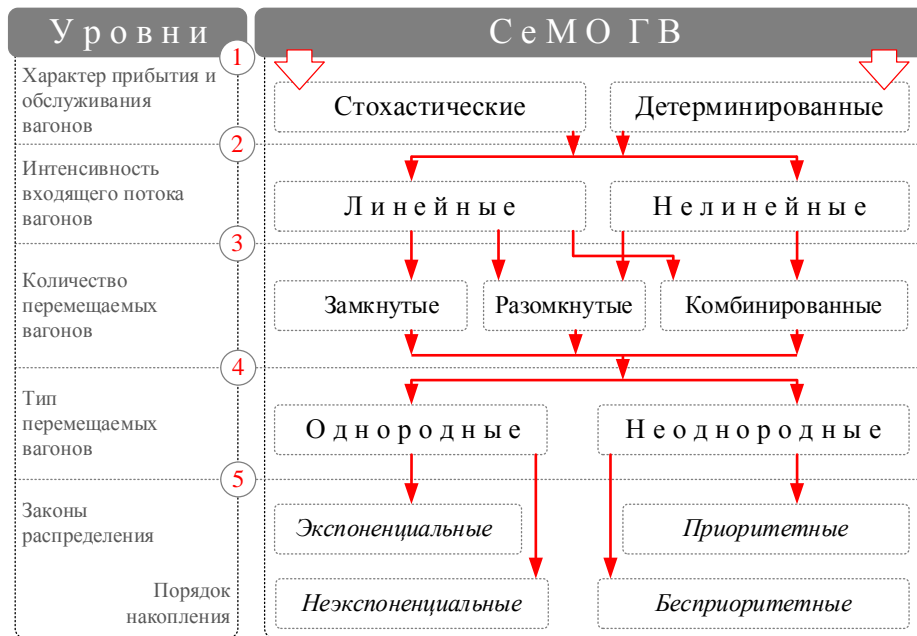


Рис. 3. Структурная схема классификации сетевых моделей СеМО ГВ

Из рис. 3 видно, что классификация СеМО ГВ может быть выполнена по 5 уровням вертикальной интеграции:

*Уровень 1. По характеру прибытия и обслуживания вагонов:*

- *Стохастические*, в которых процессы прибытия и обслуживания вагонов носят *случайный характер*, т.е. интервалы времени  $\tau$  между прибытием и длительностью обслуживания в узлах сети  $b_n$  представляют собой *случайные величины*, описываемые соответствующими законами распределения.

- *Детерминированные*, в которых интервалы времени  $\tau$  между прибытием и длительностью обслуживания вагонов в узлах сети  $b_n$  являются *определенными* (точными) величинами.

*Уровень 2. По интенсивности входящего потока вагонов в узлах сети:*

- *Линейные*, когда зависимости *регулярные* (постоянные) и связаны линейной зависимостью  $\lambda_j = \alpha_{ij}\lambda_i$ , где  $\alpha_{ij}$  – коэффи-

циент передачи вагонопотоков между узлами  $j$  и  $i$ ;

- *Нелинейные*, когда входящие потоки не связаны между собой линейной зависимостью, а значит, не могут быть рассчитаны путём решения системы линейных алгебраических уравнений  $\lambda_j = \sum_{i=0}^n p_{ij}\lambda_i$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ ), где  $p_{ij}$  – вероятность перемещения вагона из узла  $i$  в узел  $j$ .

В нелинейных СеМО ГВ входящие вагонопотоки в узлах связаны нелинейными зависимостями, что усложняет их исследование. Нелинейность СеМО ГВ может быть вызвана вероятностью отказа обслуживания вагонов в сети  $\pi_0$ , например из-за неприема станцией, где производится ремонт, по причине отсутствия технических или технологических возможностей (ограниченной емкости накопителей), а также распылением вагонов в сети, когда формируется новое назначение (адрес) после завершения обслуживания в одном из узлов сети.

Уровень 3. По количеству перемещаемых вагонов:

- разомкнутые;
- замкнутые;
- комбинированные.

Разомкнутая сеть (РСемо ГВ), представленная на рис. 4а, содержит одну

или несколько станций (внешних независимых источников), которые обеспечат прибытие вагонов, находящихся в сети обслуживания, независимо от их количества.

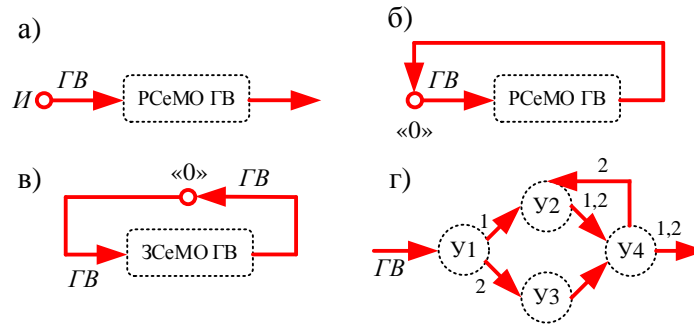


Рис. 4. Виды СеМО ГВ

Связанные с РСемо станции образования объектов для ремонта (источники вагонов), откуда они поступают в сеть и куда возвращаются после обслуживания, могут обозначаться как нулевой узел «0». В этом случае схема РСемо ГВ будет изображаться так, как это показано на рис. 4б.

Замкнутая сеть (ЗСеМО ГВ) не содержит внешних независимых источников и характеризуется тем, что в ней курсирует постоянное количество вагонов. Примером такой сети являются станции с закольцованными маршрутами обслуживания. На рис. 4в показана ее схематическая иллюстрация.

На схеме ЗСеМО ГВ выделяется стрелка, отображающая процесс завершения обслуживания вагонов в сети и своевременного их поступления обратно. Такой прием позволяет рассматривать вагоны, завершившие своё обслуживание, как прибывшие из зависимого источника образования. По аналогии с РСемо ГВ на выделенной стрелке ЗСеМО ГВ отмечается условная точка «0», рассматриваемая как нулевой узел. Иногда она трактуется как фиктивная СМО ГВ с нулевой длительностью обслуживания или как зависимый источник вагонов в момент их прибытия. Наличие нулевого узла «0» в ЗСеМО ГВ обеспечивает возможность определения временных характеристик данной сети от-

носительно этого узла. В частности, время пребывания вагонов в ЗСеМО ГВ рассматривается как промежуток времени между двумя соседними моментами их проследования через нулевой узел.

Комбинированная СеМО ГВ представляет собой комбинацию Р и З СеМО ГВ, в которую, кроме постоянно перемещаемых вагонов в сети, со станций образования (из независимых источников) поступают вагоны одного или нескольких типов.

Уровень 4. По типу перемещаемых вагонов:

- *Однородные* – одного типа вагонов (однородный поток).
- *Неоднородные* – нескольких типов вагонов (неоднородный поток), различающихся длительностью обслуживания, приоритетом или маршрутами.

На рис. 4г представлен граф, на соответствующих дугах которого маршруты вагонов задаются указанием номера их типа.

Будем использовать следующие обозначения *параметров* разрабатываемой линейной РСемо ГВ и *однородной экспоненциальной* ЗСеМО ГВ:

- $n$  – число узлов в сети;
- $K_1, \dots, K_n$  – число обслуживающих приборов в узлах сети;

•  $P = [p_{ij} | i, j = 0, 1, \dots, n]$  – матрица вероятностей перемещений;

•  $\Lambda_0$  – интенсивность прибытия вагонов в сеть;

•  $b_1, \dots, b_n$  – длительности обслуживания вагонов в узлах сети.

Основные характеристики СеМО ГВ делятся на узловые и сетевые. Узловые характеристики сети при стационарном режиме такие же, как и для СМО ГВ. По узловым характеристикам рассчитываются средние значения (математические ожидания) сетевых характеристик:

•  $Y = \sum_{j=1}^n y_j$  – суммарная нагрузка сети;

•  $R = \sum_{j=1}^n \rho_j$  – суммарная загрузка сети;

•  $L = \sum_{j=1}^n l_j$  – суммарное количество вагонов в очередях сети;

•  $M = \sum_{j=1}^n m_j$  – суммарное количество вагонов в сети;

•  $T = \sum_{j=1}^n \alpha_j t_j$  – время ожидания и нахождения вагонов в сети;

•  $\Lambda_0 = \frac{M}{U}$  – производительность сети.

Сетевые характеристики СеМО ГВ связаны между собой такими же соотношениями, как и системные ( $y, \rho, l, m, t, \lambda$ ).

Для неоднородной СеМО ГВ перечисленные выше характеристики могут определяться как для каждого типа вагонов в отдельности, так и для их объединенного суммарного вагонопотока.

### Сетевая модель сервисного технического обслуживания грузовых вагонов

На основе изложенного выше материала, разработанной авторами ранее концептуальной модели [10], которая воспроизведена на рис. 5, создана предпосылка

для дальнейшего исследования по созданию математической модели СТО ГВ и ее параметризации.

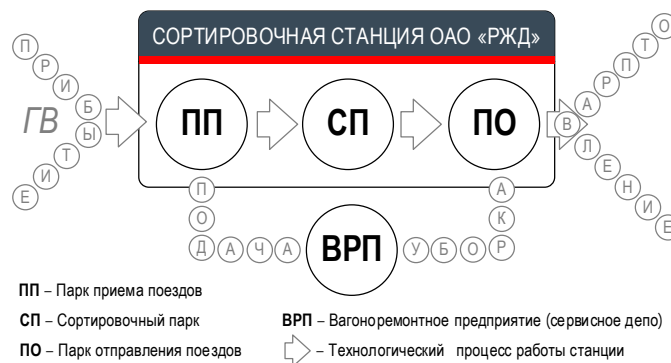


Рис. 5. Концептуальная модель СТО ГВ [11]

Суть настоящего исследования заключается в следующем. На этапе создания концептуальной модели [10] авторы предлагали технологический процесс работы железнодорожной станции и примыкающего к ней вагоноремонтного предприятия (ВРП) разделять на фазы сервисного обслуживания (рис. 6). Методологию фазного обслуживания грузовых вагонов предлагали исследователи в прошлом веке, например в работе [7], однако настоящая

статья освещает новый подход и современный взгляд на данную технологию.

Фундаментальной особенностью данного подхода является то, что предлагаемую ранее технологическую систему сервисного технического обслуживания грузовых вагонов (СТО ГВ), которая включает в себя станцию и примыкающее к ней ВРП, теперь мы будем называть *сетью*, а входящие в её структуру объекты рассматривать как отдельные СМО в виде узлов – У.

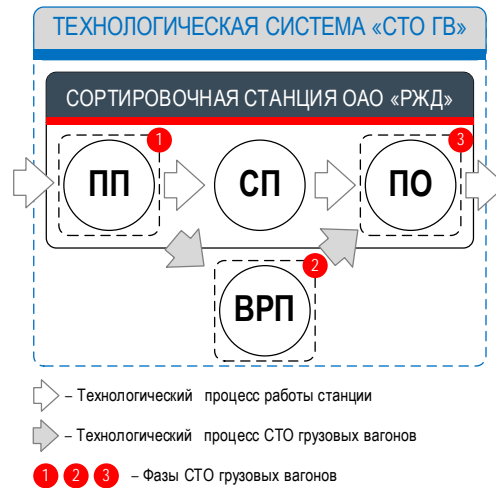


Рис. 6. Многофазная модель СТО ГВ [11]

Условную одностороннюю сортировочную станцию (рис. 7) можно представить уже не как систему, как это было ра-

нее [10], а в виде *технологической сети* – СеМО ГВ (рис. 8).

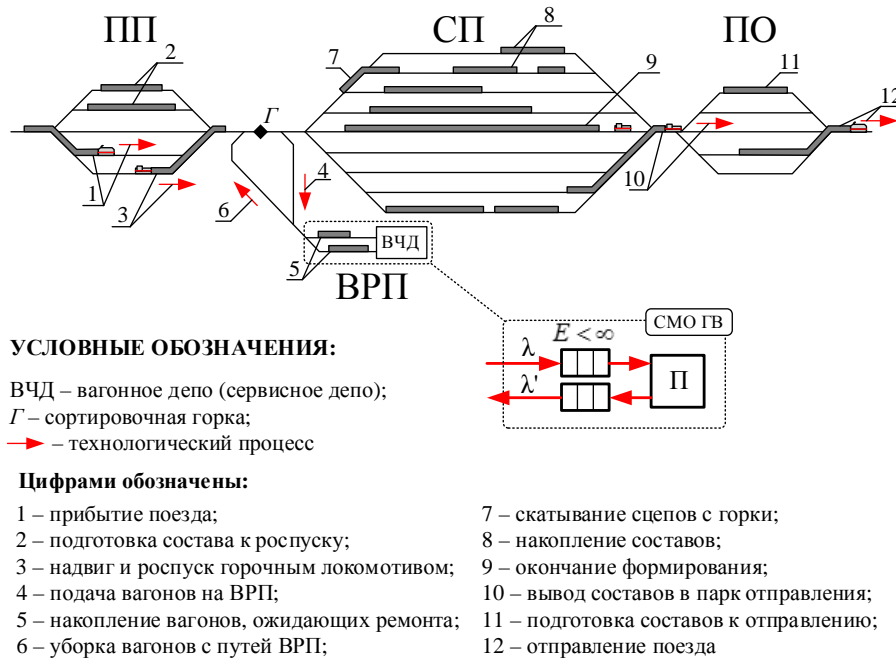


Рис. 7. Схема технологии работы односторонней сортировочной станции ОАО «РЖД»

Основными элементами данной сети являются узлы У1, ..., У4, представляющие собой СМО грузовых вагонов. В качестве узлов СеМО ГВ представлены: У1 – предгорочный парк (прибытия) ПП; У2 – сортировочный (подгорочный) парк СП, где происходит накопление вагонов и формируются составы; У3 – вагоноремонтное предприятие; У4 – парк отправления ПО.

Стоит отметить, что на схеме указаны всего лишь два обслуживающих прибора П: в узле У2 – сортировочная горка П2, в узле У3 – вагонсборочный участок (ремонтные позиции) П3. Это связано с тем, что данные приборы являются *статическими*, т.е. не меняют своего положения в пространстве, в то время как локомотивы (поездные, маневровые, горочные) меняют свою дислокацию в сети и являются *динамическими*.

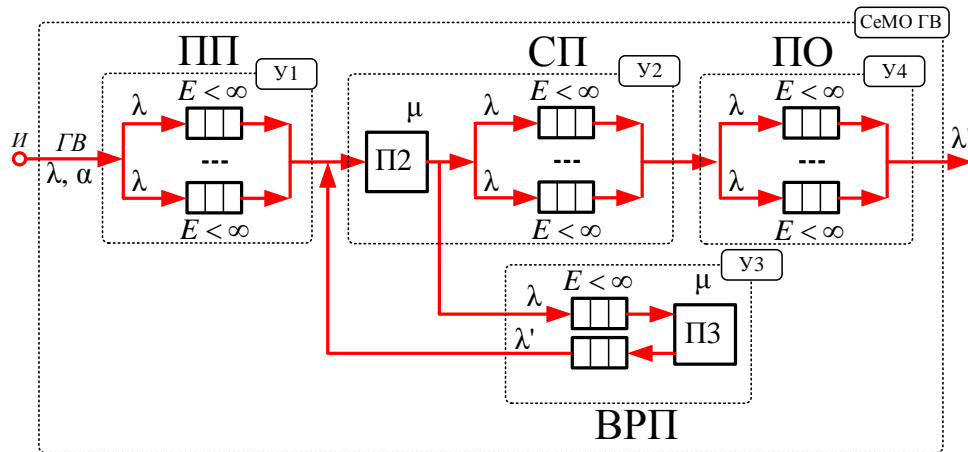


Рис. 8. Предлагаемая сеть сервисного технического обслуживания грузовых вагонов CeMO GB

Станционные пути в парках ПП, СП, ПО и тракционные пути ВРП представлены на рис. 8 как накопители ограниченной емкости ( $E < \infty$ ), так как они рассчитаны на определенное количество вагонов. Соответственно емкость накопителей в модели сети будет измеряться в физических вагонах.

Входящий поток  $\lambda$  можно рассматривать для вагонов, поступающих как в сеть,

так и в её отдельные узлы, т.е. в парк ПП или на пути ВРП.

Схема CeMO GB для простоты стратии представлена в виде ориентированного графа на рис. 9. Вершины графа CeMO GB соответствуют узлам  $U_1, \dots, U_4$ , а ребра отображают технологические процессы основных операций с вагонами, выполняемых в качестве маршрутов перемещения.

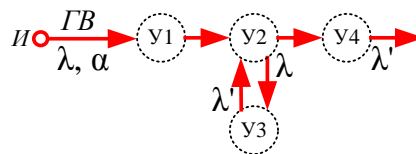


Рис. 9. Граф CeMO GB

Ключевая идея настоящего исследования заключается в том, что ВРП можно рассматривать как отдельную СМО со своим входящим потоком без учета вагонов, прибывающих на станцию. Это необходимо для того, чтобы технологические операции по ремонту (Р) и техническому обслуживанию (ТО) можно было рассмотреть отдельно, детализируя весь технологический процесс на ВРП. В свою очередь, структуру ВРП в виде отдельных участков

(цехов) можно представить как отдельные СМО, и тогда уже ВРП по отношению к ним становится CeMO, а они ее узлами.

Из этого следует вывод, что, исследуя объекты железнодорожной инфраструктуры, можно выполнять научный подход от общего к частному, т.е. от сети к отдельным системам, которые будут являться уже её узлами, и наоборот, изучая отдельные узлы систем, своё исследование можно расширить до сетевого масштаба.

### Заключение

В настоящей статье предлагается современный взгляд на исследование транспортно-технологических комплексов железнодорожного транспорта с помощью

моделирования, основанного на теории массового обслуживания.

Для описания транспортно-технологического комплекса железных дорог в качестве математической модели

можно применить модели массового обслуживания в виде разомкнутых и замкнутых сетей.

Сеть сервисного технического обслуживания грузовых вагонов может состоять из систем (узлов) с накопителями (путями) ограниченной емкости (вместимости). В зависимости от количества обслуживающих приборов системы (узлы) могут быть как одноканальные (сортировочная горка, вагоносборочный участок депо), так и многоканальные (локомотивы, ремонтные позиции).

Модель сети сервисного технического обслуживания грузовых вагонов в зависимости от характера процессов поступления и обслуживания вагонов может быть стохастической или детерминированной; по виду зависимостей, связывающих интенсивности входящих потоков вагонов в разных узлах, - линейной или нелинейной; по количеству вагонов, перемещаемых в сети, - разомкнутой, замкнутой или комбинированной; по типу вагонов, перемещаемых в сети, - однородной или неоднородной.

В линейной сети интенсивность входящего потока вагонов в любом узле связана линейной зависимостью с интенсивностью источника образования вагонов

через коэффициент передачи, который показывает среднее количество попаданий вагона в данный узел за время его нахождения в сети. В нелинейной сети интенсивности потоков вагонов в узлах (системах) связаны нелинейными зависимостями. Нелинейность сети может быть вызвана отсутствием возможности обслуживания или изменением назначения (адреса) вагонов.

Разомкнутая сеть содержит один или несколько внешних независимых источников (станций образования) вагонов, причем в сети одновременно может находиться массовое количество вагонов. Замкнутая сеть, в отличие от разомкнутой, не содержит независимых внешних источников вагонов и характеризуется тем, что в ней перемещается определенное количество вагонов. Такая система характерна для замкнутых маршрутов использования грузовых вагонов по назначению.

Изложенный материал является теоретической основой для исследования структурно-функциональных свойств транспортно-технологических комплексов железных дорог и предпосылкой для создания математических моделей реальных объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов, Н.И. Применение теории вероятностей в транспортных расчетах: учеб. пособие для студентов и инженеров ж.-д. транспорта / Н.И. Федотов, А.В. Быкадоров. - Новосибирск: Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. транспорта, 1969. - 188 с.
2. Кёниг, Д. Стационарные системы массового обслуживания с зависимостями / Д. Кёниг, В.В. Рыков, Ф. Шмидт // Итоги науки и техники. - 1981. - Т. 18. - С. 95-186.
3. Gnedenko, B.W. Handbuch der Bedienungstheorie. Band 2 / B.W. Gnedenko, D. Konig - Berlin: Akademie-Verlag, 1983. - 450 p.
4. Jackson, J.R. Networks of waiting lines / J.R. Jackson // Operational Research Quarterly. - 1957. - Vol. 5. - № 4. - P. 618-521.
5. Jackson, R.R.P. Queueing systems with phase type service / R.R.P. Jackson // Operational Research Quarterly. - 1954. - Vol. 5. - P. 109-120.
6. Падня, В.А. Применение теории массового обслуживания на транспорте (железнодорожном, автомобильном, водном и воздушном) / В.А. Падня. - М.: Транспорт, 1968. - 208 с.
7. Повороженко, В.В. Повышение производительности грузового вагона / В.В. Повороженко, И.А. Орлова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Транспорт, 1979. - С. 142-150.
8. Венгерский, Е. Вероятностные методы в проектировании транспорта / Е. Венгерский; пер. с пол. И.В. Шварца. - М.: Транспорт, 1979. - 320 с.
9. Поттгофф, Г. Учение о транспортных потоках: монография: [пер. с нем.] / Г. Поттгофф. - М.: Транспорт, 1975. - 344 с.
10. Евсеев, Д.Г. Методологическая концепция технологии сервисного технического обслуживания грузовых вагонов / Д.Г. Евсеев, М.Ю. Куликов, А.С. Кузютин // Фундаментальные и прикладные проблемы машиностроения: сб. тр. VI междунар. конф. «Конструкторско-технологическая информатика» / под ред. А.В. Морозовой. - М.: Спектр, 2017. - С. 90-97.
11. Алиев, Т.И. Основы моделирования дискретных систем / Т.И. Алиев. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. - 363 с.
12. Алиев, Т.И. Основы проектирования систем / Т.И. Алиев. - СПб.: Ун-т ИТМО, 2015. - 120 с.



1. Fedotov, N.I. *Probability Theory Application in Transport Computations: manual for students and engineers of railway communications* / N.I. Fedotov, A.V. Bykadorov. – Novosibirsk: Novosibirsk Institute of Railway Communications Engineers, 1969. – pp. 188.
2. Koenig, D. Stationary systems of mass servicing with dependences / D. Koenig, V.V. Rykov, F. Schmidt // *Results of Science and Engineering*. – 1981. – Vol.18. – pp. 95-186.
3. Gnedenko, B.W. *Handbuch der Bedienungstheorie. Band 2* / B.W. Gnedenko, D. Konig - Berlin: Akademie-Verlag, 1983. - 450 p.
4. Jackson, J.R. Networks of waiting lines / J.R. Jackson // *Operational Research Quarterly*. - 1957. - Vol. 5. - № 4. - P. 618-521.
5. Jackson, R.R.P. Queueing systems with phase type service / R.R.P. Jackson // *Operational Research Quarterly*. - 1954. - Vol. 5. - P. 109-120.
6. Padnya, V.A. *Application of Mass Servicing Theory on Transport (railway, motor transport, water transport and air transport)* / V.A. Padnya. – М.: Transport, 1968. – pp. 208.
7. Povorozhenko, V.V. *Fright Car Productivity Increase* / V.V. Povorozhenko, I.A. Orlova. – 2-d Edition revised and updated – М.: Transport, 1979. – pp. 142-150.
8. Vengersky, E. *Probability Methods in Transport Design* / E. Vengersky; transl. from Polish. I.V. Schwatz. – М.: Transport, 1979. – pp. 320. .
9. Potthoff, G. *Theory of Traffic: monograph: [transl. from German]* / G. Potthoff. – М.: Transport. – 1975. – pp. 344.
10. Evseev, D.G. Methodological concept of technology for fright car servicing / D.G. Evseev, M.Yu. Kulikov, A.S. Kuzyutin // *Fundamental and Applied Problems of Mechanical Engineering: Proceedings of the VI-th Inter. Conf. "Design-Technological Informatics"* / under the editorship of A.V. Morozova. – М.: Spectrum, 2017. – pp. 90-97.
11. Aliev, T.I. *Fundamentals of Discrete System Modeling* / T.I. Aliev. – S-Pb.: S-Pb.SU ITMO, 2009. – pp. 363.
12. Aliev, T.I. *Fundamentals of System Modeling* / T.I. Aliev. – S-Pb.: U ITMO, 2015. – pp. 120.

Статья поступила в редколлегию 24.03.18.

Рецензент: к.т.н., руководитель департамента системного электрического инжиниринга  
ООО «Бомбардье Транспортейшн»  
Чекмарев А.Е.

#### Сведения об авторах:

**Евсеев Дмитрий Геннадьевич**, д.т.н., профессор, президент Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (МИИТ), тел. +7 (495) 769-60-78, e-mail: [evseevvg@gmail.com](mailto:evseevvg@gmail.com).

**Куликов Михаил Юрьевич**, д.т.н., профессор Института конструкторско-технологической ин-

**Evseev Dmitry Gennadievich**, D. Eng., Prof., President of Institute of Transport Engineering and Control Systems of Russian Engineers of Communications (MIIT), e-mail: [evseevvg@gmail.com](mailto:evseevvg@gmail.com).

**Kulikov Michael Yurievich**, D. Eng., Prof. of Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: [muk.56@mail.ru](mailto:muk.56@mail.ru).

форматики РАН, тел.: +7 (964) 578-56-89, e-mail: [muk.56@mail.ru](mailto:muk.56@mail.ru).

**Кузютин Андрей Сергеевич**, диспетчер департамента эксплуатации подвижного состава АО «Федеральная грузовая компания», тел.: +7 (916) 959-85-45, e-mail: [kuzyutinas@yandex.ru](mailto:kuzyutinas@yandex.ru).

**Kuzyutin Andrey Sergeevich**, Traffic Superintendent of the Dep. of Rolling-Stock Operation of SC "Federal Fright Company", e-mail: [kuzyutinas@yandex.ru](mailto:kuzyutinas@yandex.ru).