

## Транспорт

УДК 629.4.083

DOI: 10.30987/article\_5b86566cc26a88.37720798

М.Ю. Куликов, А.С. Кузютин, М.И. Дыбо

### РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВАГОНРЕМОНТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Разработана структура математической модели технологии работы вагоноремонтного предприятия при сервисном техническом обслуживании грузовых вагонов. Создана предпосылка для дальнейшего исследования объектов транспортной инфраструктуры и её вагонопотоков.

**Ключевые слова:** грузовые вагоны, математическая модель, вагоноремонтное предприятие, технологическая система, ремонт, массовое обслуживание.

M. Yu. Kulikov, A.S. Kuzyutin, M.I. Dybo

### SIMULATOR DEVELOPMENT OF CAR-REPAIR PLANT TECHNOLOGICAL SYSTEM

The purpose of this work is a simulator development and parameterization of a car-repair plant technological system at service engineering maintenance of freight cars.

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

The result of the mentioned investigation is development of a simulator structure of a car-repair plant work technology at freight-car service engineering

maintenance, and also a formation of preconditions for the further investigations of objects of transport infrastructure and its car flows.

The developed simulator of a technological system of a railway station and a car-repair plant will allow systematizing the functioning of a car-repair plant and transport infrastructure objects connected with it.

**Key words:** freight cars, simulator, car-repair plant, technological system, repair, mass service.

#### Введение

Теоретический путь исследования технологической системы, связанный с её моделированием, опирается на системный подход, целью которого является проектирование системы определенного качества. Данное проектирование основывается на результатах системного анализа, способного выявить причинно-следственные связи между параметрами и характеристиками исследуемой системы. Реализовать эту работу возможно с применением математической модели, позволяющей прогнозировать события при изменении нагрузки и параметров проектируемой системы.

Важным требованием, предъявляемым к модели, является ее адекватность исследуемому объекту, которая возможна за счет детализации изучаемой системы в соответствии с целью исследования.

Процессы функционирования технологической системы практически невозможно описать всеобъемлюще и детально. Главным образом это объясняется её многочисленными особенностями и определённой сложностью. Основной задачей при моделировании является соблюдение баланса между простотой модели и необходимостью учета многочисленных особенностей, присущих реальным объектам исследования.

В широком понимании моделирование предполагает последовательные стадии исследования: формулировку цели, разработку концептуальной и математической моделей, выбор параметров и характеристик, а также методов и средств моделирования. Разрабатываемая модель проверяется на адекватность, на ней проводятся соответствующие эксперименты и рас-

считываются основные характеристики. Результатом моделирования станет анализ полученных данных и выявление свойств, присущих реальным объектам исследования.

Исследование вагоноремонтного предприятия (далее – ВРП), связанное с выявлением свойств и закономерностей его функционирования, также возможно на основе моделирования, целью которого является модернизация существующей или проектирование новой технологической системы. На всех стадиях данного исследования последовательно будут решаться взаимосвязанные задачи моделирования ВРП и анализа его свойств. Результатом моделирования станут рекомендации по модернизации существующих или созданию новых технологических процессов.

Грузовые вагоны, поданные на ВРП, и само сервисное депо можно описать терминологией случайных процессов с использованием методов теории вероятностей [1]. При этом широкое применение находит одно из ее направлений – теория массового обслуживания (ТМО). Модель, построенная на основе данной теории (далее – ММО), способна отразить структуру ВРП и его функциональную организацию.

### Система массового обслуживания грузовых вагонов

Опираясь уже на современные теоретические работы по ТМО в части моделирования и проектирования дискретных систем [7; 8], исследуемую технологическую систему ВРП можно представить в

Стоит отметить, что на железнодорожном транспорте масштабные работы с применением методов ТМО проводились во второй половине двадцатого столетия отечественными [1» 2] и зарубежными [3; 4] исследователями.

В попытке создания концепции системы сервисного технического обслуживания грузовых вагонов (далее – СТО ГВ) на первых стадиях своего исследования авторы сформулировали цель [5] и предложили концептуальную модель [6]. Данные работы в большей степени опираются на методологию и научный подход исследователей прошлого века. Однако с тех пор на железнодорожном транспорте произошли существенные изменения. Помимо изготовления инновационного подвижного состава в последнее десятилетие происходит бурное развитие и внедрение информационных технологий и вычислительных систем. Работы по ТМО появились уже и в этой области [7; 8].

Целью настоящей работы является разработка математической модели технологической системы ВРП и ее параметризация на основе современной методологии и средств моделирования.

виде системы массового обслуживания (СМО) грузовых вагонов (ГВ). Иллюстрирующий ее пример показан на рис. 1.

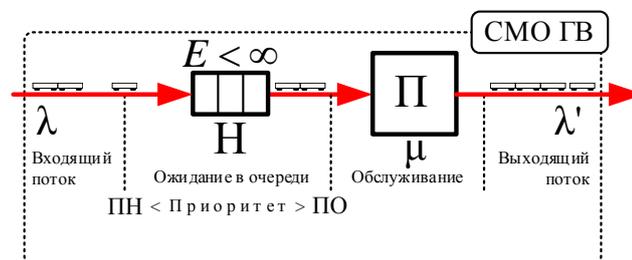


Рис. 1. Структурная схема математической модели СМО ГВ

Основными элементами модели являются *обслуживающий прибор* П – объект, в котором выполняются операции по обслуживанию вагонов с *интенсивностью*

$\mu$ , и *накопитель* Н (железнодорожные пути) емкостью  $E$ , в котором они находятся, ожидая своего обслуживания. Если  $E \rightarrow \infty$ , то накопитель будет *неограниченной* емко-

сти. Примером такого накопителя может быть перегон, т.е. часть железнодорожной линии до входного светофора станции, на которой производится СТО ГВ. Если  $E < \infty$ , то накопитель уже становится *ограниченной* емкости. Примерами таких накопителей являются станционные и тракционные пути сервисного депо, так как их ограниченность связана с вместимостью вагонов.

В качестве *заявок* на обслуживание, поступивших в систему, выступают *грузовые вагоны*; их количество, распределенное во времени, образует *входящий поток*  $\lambda$ . Прибывшие вагоны могут находиться в состояниях *обслуживания* или *ожидания*, когда все П заняты. Вагоны в накопителе образуют *очередь*, *длину l* которой определяет количество вагонов, ожидающих своего обслуживания в П.

Правило поступления вагонов в накопитель определяет *порядок* (дисциплина) *накопления* (ПН), а выбор их из очереди – *порядок* (дисциплина) *обслуживания* (ПО). Преимущество поступления в Н или

выбор из очереди одного *типа* вагонов по отношению к другим определяет *приоритет*. Тип вагонов определяется *длительностью обслуживания b* или приоритетом. Когда различий в обслуживании нет, вагоны могут быть представлены как вагоны одного типа независимо от их модели и рода.

Разрабатываемую модель СМО грузовых вагонов можно классифицировать следующим образом:

- по количеству типов вагонов, поступающих в систему (*однородный* или *неоднородный* поток);
- по количеству приборов (*одноканальная*, содержащая один прибор, или *многоканальная*, содержащая  $K$  приборов  $\Pi_1, \dots, \Pi_K$  ( $K > 1$ ));
- по числу мест в накопителе (*ограниченной* или *неограниченной* ёмкости).

На рис. 2 представлены варианты моделей СМО ГВ, схематически изображенные согласно указанной классификации.



Рис. 2. Классификация моделей СМО ГВ

Для компактного описания СМО в зарубежной [3; 4] и современной отечественной [7; 8] литературе используются обозначения, предложенные английским математиком Дэвидом Джорджем Кендал-

лом [9], которые впоследствии были развиты до вида A/B/N/L, где A и B – законы распределений интервалов времени прибытия вагонов и длительности их обслуживания; N – число приборов ( $N = 1$ ,

$2, \dots, \infty$ );  $L$  – количество вагонов в накопителе, которое может принимать целые значения  $0, 1, 2, \dots$  (отсутствие буквы  $L$  означает, что накопитель неограниченной ёмкости).

Для законов распределений  $A$  и  $B$  приняты следующие обозначения:

$G$  (General) – произвольное (общего вида);

$M$  (Markovian) – экспоненциальное (показательное);

$D$  (Deterministik) – детерминированное;

$U$  (Uniform) – равномерное;

$E_k$  (Erlangian) – Эрланга  $k$ -го порядка (с  $k$  последовательными одинаковыми экспоненциальными фазами);

$h_k$  (hipoexponential) – гипоэкспоненциальное  $k$ -го порядка (с  $k$  последовательными разными экспоненциальными фазами);

$H_r$  (Hiperexponential) – гиперэкспоненциальное порядка  $r$  (с  $r$  параллельными экспоненциальными фазами);

$g$  (gamma) – гамма-распределение;

$P$  (Pareto) – распределение Парето.

Для описания модели ВРП будем использовать совокупность *параметров* (исходных данных) и *характеристик* (функций от параметров).

Основные параметры модели ВРП:

$\lambda$  – интенсивность входящего потока (количество вагонов);

$h$  – количество прибывших типов вагонов;

$K$  – количество приборов;

$k$  – количество накопителей;

$E$  – ёмкость накопителей;

$\tau = 1/\lambda$  – интервал времени прибытия вагонов;

$v_\tau$  – коэффициент вариации интервалов прибытия вагонов;

$b$  – среднее значение длительности обслуживания;

$v_b$  – коэффициент вариации длительности обслуживания;

$ПН$  – порядок накопления (дисциплина буферизации);

$ПО$  – порядок (дисциплина) обслуживания.

Характеристики модели ВРП при *стохастической* подаче вагонов являются *случайными* величинами и полностью описываются соответствующими законами распределений. На практике принято ограничиваться определением только средних значений (математических ожиданий).

Основные характеристики модели ВРП с однородным потоком вагонов:

$y$  – нагрузка ВРП;

$\rho$  – загрузка ВРП;

$l$  – длина очереди на тракционных путях;

$m$  – количество вагонов на ВРП;

$t_{ож}$  – время ожидания обслуживания на тракционных путях;

$t_{обсл}$  – время пребывания вагонов на ВРП;

$\lambda'$  – производительность ВРП (выходящий поток);

$\lambda''$  – интенсивность отказов в обслуживании;

$\pi_n$  – вероятность отказа в обслуживании;

$\pi_0$  – вероятность обслуживания;

$\eta$  – коэффициент простоя ВРП;

Основные характеристики модели ВРП с неоднородным потоком вагонов:

- характеристики по каждому типу вагонов;

- характеристики суммарного (объединенного) потока вагонов.

Используя изложенный выше материал на практике, можно смоделировать реально существующее ВРП и представить его как математическую модель СМО.

### Математическая модель вагоноремонтного предприятия

В качестве примера разрабатываемой модели технологической системы ВРП возьмем вагоноремонтное депо (ВЧДр) Люблино (клеймо 333), входящее в структуру АО «ВРК-1» и находящееся на территории Московско-Курского региона Мос-

ковской железной дороги. На рис. 3 для наглядности и визуализации дальнейшего моделирования представлен общий вид ВЧДр Люблино с размещением на его тракционных путях грузовых вагонов, ожидающих своего обслуживания. В каче-

стве основных объектов данного ВРП на рис. 3 представлены вагоноборочный участок и четыре тракционных пути (№ 4, 5, 6, 7), на которых грузовые вагоны ожидают своего обслуживания в вагоноборочном участке. Как видно из рис. 3, с путей № 5 и 6 производится подача вагонов на ремонтные позиции вагоноборочного участка, т.е. так называемая «зарядка».

Структуру данного ВРП удобнее представить в виде схемы (рис. 4).

Как видно из рис. 4, помимо перечисленных выше тракционных путей в реальности присутствует еще один путь, № 11Т, с максимальной вместимостью 26 вагонов. На данный путь осуществляется подача вагонов со станции назначения (190008 Люблино-Сортировочное). Данная операция происходит после оформления мастером ВРП заявки формы ВУ-78, на

основе которой маневровый диспетчер осуществляет подачу вагонов на тракционные пути.

Факт подачи вагонов на ВРП характеризует выполнение заявки ВУ-78 и фиксируется в акте формы ВУ-80 мастером ВРП.

Соответственно уборку вагонов производят на основании поданной мастером ВРП заявки формы ВУ-79, а факт уборки фиксируется в акте формы ВУ-81 дежурным по станции.

Пути № 4 и 7 являются тупиковыми. Путь № 4 служит для накопления вагонов, а № 7, помимо накопления вагонов, предназначен ещё и для выгрузки колесных пар (запасных частей) и погрузки металлолома.



Рис. 3. ВЧДр Люблино

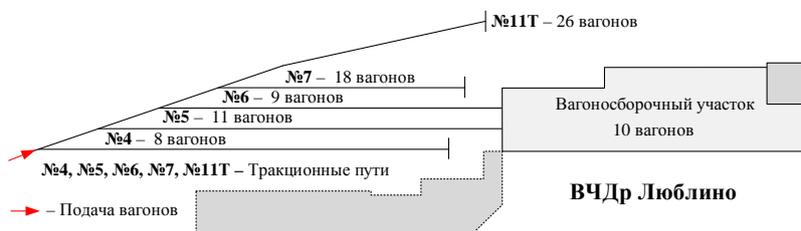


Рис. 4. Схема ВЧДр Люблино

Показанную на рис. 4 схему ВРП можно представить в виде модели СМО (рис. 5).

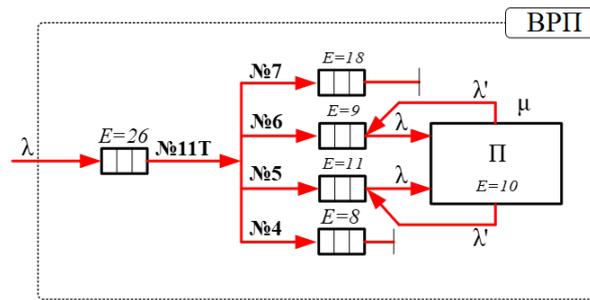


Рис. 5. Структура математической модели ВЧДр Люблино

Из рис. 5 видно, что в качестве обслуживающего прибора  $\Pi$  выступает вагоноборочный участок, в котором выполняются операции по техническому обслуживанию (ТО) и ремонту (Р) вагонов с интенсивностью  $\mu$ . В качестве накопителей ограниченной емкости выступают тракционные пути № 11Т, 4, 5, 6, 7, так как они вмещают определенное количество грузовых вагонов: № 11Т – 26, № 4 – 8, № 5 – 11, № 6 – 9, № 7 – 18. Обслуживающий прибор  $\Pi$  также имеет ограниченную вместимость – 10 вагонов (по 5 ремонтных позиций на каждом из путей № 5 и 6).

На рис. 5 указан один обслуживающий прибор (вагоноборочный участок), т.е. в данном случае модель является одноканальной. Это связано с тем, что данная статья освещает общие принципы моделирования ВРП и авторы решили упростить рассматриваемую ММО. В реальности же каждая из 10 ремонтных позиций, которые

объединяет вагоноборочный участок, представляет собой отдельный обслуживающий прибор  $\Pi_k$ . Более адекватная модель ВРП будет представлять многоканальную СМО с неоднородным входящим потоком. Дальнейшая детализация разрабатываемой модели ВРП позволит повысить ее адекватность, учесть многочисленные особенности, присущие реальному ВРП.

В этой связи материал своих дальнейших публикаций по моделированию ВРП авторы намерены максимально приблизить к реально существующему ВРП с целью получения достоверных результатов.

Полученные в процессе моделирования результаты позволят выработать соответствующие рекомендации по сокращению времени простоя вагонов в ремонте и возможной модернизации существующих технологических процессов ремонта.

## Заключение

В настоящей статье предлагается современный взгляд на исследование вагоноремонтного предприятия как транспортно-технологической системы с помощью моделирования, основанного на теории массового обслуживания.

Для описания объектов вагоноремонтного предприятия в качестве математических моделей можно применить модели массового обслуживания, которые делятся на одноканальные и многоканальные технологические системы.

Описание входящего потока грузовых вагонов в простейшем случае предполагает задание его интенсивности. Поток грузовых вагонов может быть стохастиче-

ским (случайным) или детерминированным (регулярным), стационарным или нестационарным, ординарным (одиночным) или неординарным (групповым).

Для получения сравнительно простых аналитических зависимостей характеристик от параметров следует руководствоваться предположением о простейшем входящем потоке вагонов.

Длительность обслуживания вагонов в приборе в простейшем случае может быть задана средним значением или величиной обратной – интенсивностью обслуживания, характеризующей среднее количество грузовых вагонов, которое может

быть обслужено прибором за единицу времени.

Технологические операции перемещения грузовых вагонов задаются порядком (дисциплиной) накопления и обслуживания. Порядок обслуживания может быть приоритетным (в зависимости от наличия запасных частей и рода вагона) или беспriorитетным (по мере поступления вагонов, т.е. живая очередь).

Если в модели вагоны различаются длительностью обслуживания или приоритетом, то их можно отнести к разным типам.

### 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; Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. транспорта. – Новосибирск, 1969. – 188 с.
2. Падня, В.А. Применение теории массового обслуживания на транспорте (железнодорожном, автомобильном, водном и воздушном) / В.А. Падня. – М.: Транспорт, 1968. – 208 с.
3. Венгерский, Е. Вероятностные методы в проектировании транспорта / Е. Венгерский; пер. с пол. И.В. Шварца. – М.: Транспорт, 1979. – 320 с.
4. Поттгофф, Г. Учение о транспортных потоках: монография: [пер. с нем.] / Г. Поттгофф. – М.: Транспорт, 1975. – 344 с.
5. Кузютин, А.С. Совершенствование технологического процесса сервисного обслуживания грузовых вагонов / А.С. Кузютин, М.Ю. Куликов // *Фундаментальные и прикладные проблемы ма-*

1. Fedotov, N.I. *Probability Theory Application in Transport Computations: manual for students and communications engineers* / N.I. Fedotov, A.V. Bykadorov; Novosibirsk Institute of Railway Transport. – Novosibirsk, 1969. – pp. 188.
2. Padnya, V.A. *Mass Maintenance Theory Application on Transport (on Railway, Motor Transport, Water Transport and Air Transport)* / V.A. Padnya. – M.: Transport, 1968. – pp. 208.
3. Vengersky, E. *Probabilistic Methods in Transport* / E. Vengersky; transl. from Polish. I.V. Schwarz. – M.: Transport, 1979. – pp. 320.
4. Potthoff, G. *Teaching on Transport Flows: monograph: [transl. from German]* / G. Potthoff. – M.: Transport, 1975. – pp. 344.
5. Kuzutyn, A.S. Improvement of engineering procedure of freight car maintenance / A.S. Kuzutyn, M.Yu. Kulikov // *Fundamental and Applied Prob-*

Изложенный материал является теоретической основой для создания математической модели вагоноремонтного предприятия, способной описать его функционирование как единого целого, а также на уровне отдельных цехов, участков, станков, оборудования т.д.

Разрабатываемая математическая модель вагоноремонтного предприятия позволит определить его основные параметры эффективности и оптимизировать технологию работы так, чтобы на выходе улучшить качественные показатели обслуживания и получить экономический эффект.

6. 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. 97-100.
7. Алиев, Т.И. Основы моделирования дискретных систем / Т.И. Алиев. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
8. Алиев, Т.И. Основы проектирования систем / Т.И. Алиев. – СПб.: Ун-т ИТМО, 2015. – 120 с.
9. Kendall, D.G. Stochastic processes occurring in the theory of the queues and their analysis by the method of the imbedded Markov chains / D.G. Kendall // *Ann. Math. Statist.* - 1953. - V. 24. - P. 338-354.

6. Evseev, D.G. Methodological concept of freight car service engineering maintenance technology / D.G. Evseev, M.Yu. Kulikov, A.S. Kuzutyn // *Fundamental and Applied Problems of Mechanical Engineering: Transactions of the VI-th Inter. Conf. "Design-Technological Informatics"* / under the editorship of A.V. Morozova. – M.: Spectrum, 2017. – pp. 97-100.
7. Aliev, T.I. *Fundamentals of Discrete System Simulation* / T.I. Aliev. – S-Pb.: S-PbSU ITMO, 2009. – pp. 363.
8. Aliev, T.I. *Fundamentals of System Design* / T.I. Aliev. – S-Pb.: University ITMO, 2015. – pp. 120.

9. Kendall, D.G. Stochastic processes occurring in the theory of the queues and their analysis by the me-

thod of the imbedded Markov chains / D.G. Kendall // Ann. Math. Statist. - 1953. - V. 24. - P. 338-354.

*Статья поступила в редколлегию 24.03.18.  
Рецензент: к.т.н., руководитель департамента  
ООО «Бомбардье Транспортейшн (Рус)»  
Чекмарев А.Е.*

#### Сведения об авторах:

**Куликов Михаил Юрьевич**, д.т.н., профессор Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: [muk.56@mail.ru](mailto:muk.56@mail.ru).

**Кузютин Андрей Сергеевич**, диспетчер департамента эксплуатации подвижного состава АО

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

**Kuzyutin Andrey Sergeevich**, Traffic Superintendant of the Dep. for Rolling-Stock Operation of J-S

«Федеральная грузовая компания», e-mail: [kuzyutinas@yandex.ru](mailto:kuzyutinas@yandex.ru).

**Дыбо Мария Ильинична**, магистрант Российского университета транспорта (МИИТ), e-mail: [mashenkadybo@yandex.ru](mailto:mashenkadybo@yandex.ru).

Co. "Federal Fright Co.", e-mail: [kuzyutinas@yandex.ru](mailto:kuzyutinas@yandex.ru).

**Dybo Maria Ilinichna**, Master degree student, Russian University of Transport (МИИТ), e-mail: [mashenkadybo@yandex.ru](mailto:mashenkadybo@yandex.ru).