

На правах рукописи



ЖАРКОВ МАКСИМ ЛЕОНИДОВИЧ

**СТОХАСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ В ЗАДАЧАХ
МОДЕЛИРОВАНИЯ МИКРОЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук (ИДСТУ СО РАН).

Научный руководитель: **Кзаков Александр Леонидович**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник ИДСТУ СО РАН

Официальные оппоненты: **Сизый Сергей Викторович**, доктор технических наук, профессор кафедры алгебры и фундаментальной информатики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Кузнецов Борис Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования и физики ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»

Защита диссертации состоится «21» июня 2019 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.070.07 на базе ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Карла-Маркса, 4, кор. 9, зал заседаний ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, кор. 2, ауд. 101, <http://dissovet.bgu.ru/dissertation/disInfo.aspx?id=68>

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина 11, БГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.070.07.

Автореферат разослан «__» мая 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Т.И. Ведерникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Использование математического моделирования является одним из ключевых способов совершенствования работы транспортной отрасли, начиная с 30-х годов прошлого века. В настоящее время математические методы широко применяются для планирования, прогнозирования и управления в транспортно-логистических системах. При этом для макро- и (отчасти) мезологистических систем обычно стремятся построить детерминированные модели. Однако эффективность функционирования транспортно-логистических систем на макро- и мезоуровнях существенно зависит от производительности микрологистических систем, при исследовании которых детерминированные модели не всегда обеспечивают должную адекватность описания. Основная причина этого заключается в необходимости учитывать множество различных факторов, под воздействием которых процессы в системе протекают по-разному при одинаковых начальных условиях.

В подобной ситуации наиболее адекватным инструментом исследования являются разного рода вероятностные (стохастические) модели, в частности, системы массового обслуживания (СМО). Именно такие модели применяются, когда, во-первых, имеющихся знаний о поведении исследуемого объекта недостаточно или имеются сомнения в их достоверности, во-вторых, адекватно описать объект исследования, в котором протекаемые процессы имеют стохастическую природу, используя детерминированные модели, гораздо сложнее, чем методом статистических испытаний, либо вообще невозможно. Например, в работах К.Д. Lewis, Ю.М. Ермольева, Н.Ю. Салмина, Л.В. Массель, С.С. Ованесяна и др. стохастические модели применяются для решения различных проблем из области экономического планирования, при этом в ряде задач учитывается наличие неполной информации. В работах А. Vanik, G. Bolch, S. Greiner, A. Law, C. Lindemann, Г.П. Башарина, П.П. Бочарова, Н.П. Бусленко, В.М. Вишневого, А.Н. Дудина, В.И. Клименок и др. стохастические методы применяются для моделирования информационно-телекоммуникационных систем. Отличительными особенностями таких систем являются случайный характер поступления данных и недетерминированная обработка вне зависимости от их семантического значения. Это позволяет использовать разработанный математический аппарат и в других областях, связанных с обработкой входящих потоков заявок различной природы. К таким системам, в частности, относится и ряд логистических.

В сфере транспорта стохастические модели применяются главным образом на уровне микрологистических транспортных систем (микро-ЛТС), которые наиболее подвержены влиянию случайных факторов. Значительный вклад в развитие данного научного направления внесли G. Potthoff, F.A. Haight, H.A. Taha, W.D. Kelton, T.L. Saaty, D. Talay и др. Исследованием математических моделей железнодорожных станций и вокзалов, моделированием транспортных процессов, а также изучением различных железнодорожных микро-ЛТС на основе стохастических моделей занимались В.М. Акулиничев, Н.П. Бусленко, С.В. Земблинов, В.А. Кудрявцев, В.А. Персианов, В.В. Повороженко, Н.В. Правдин, И.Е. Савченко, А.А. Смехов и др. Результаты изучения моделей

микро-ЛТС в качестве ключевых элементов транспортной инфраструктуры города отражены в трудах С.В. Земблинова, О.В. Кузьмина, В.Я. Негрея, К.Ю. Скалова. Авторы активно используют аппарат теории массового обслуживания в связи с тем, что такие модели являются эффективным и удобным средством для исследования объектов, в которых, во-первых, регулярно повторяются однотипные действия (принятие транспортной единицы, ожидание перед отправкой и т.д.), во-вторых, заявки поступают в систему в случайные моменты времени, т.е. процесс работы таких объектов аналогичен процессу функционирования СМО.

В настоящее время продолжается активное развитие стохастических моделей, в частности, на основе теории массового обслуживания. Можно отметить работы С. Graham, B.S. Kerner, J. Medhi, Д.Н. Власова, С.П. Вакуленко, Н.Ю. Еврееновой, Н.М. Христюка и др. Тем не менее, известные математические модели не всегда подходят для описания микро-ЛТС, поскольку последние имеют сложную организационную структуру, которая порождает многофазный процесс обслуживания. Более того, сложность изучения подобных систем увеличивается из-за специфики входящих потоков. Так, в пассажирских и грузовых терминалах необходимо рассматривать поступившую транспортную единицу как группу заявок (пассажиров, товаров и др.), которые обслуживаются отдельно друг от друга.

Таким образом, актуальной задачей современного математического моделирования является создание методики построения математических моделей работы микро-ЛТС, имеющих вид СМО с групповыми потоками заявок, и разработка на этой основе программно-алгоритмического инструментария для решения прикладных задач.

Цель и задачи исследования. Целью является разработка методики математического моделирования работы микро-ЛТС на основе теории массового обслуживания, создание численных методов и алгоритмов исследования полученных моделей, а также реализация этих методов и алгоритмов в виде программного комплекса. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие на данный момент методы изучения микро-ЛТС и обосновать выбор математического аппарата для моделирования.
2. Предложить методику построения моделей работы микро-ЛТС в виде многофазных СМО с групповым поступлением заявок.
3. Разработать и реализовать в виде программного комплекса численный метод оценки параметров модели и показателей, характеризующих эффективность работы моделируемых систем.
4. Построить модели конкретных микро-ЛТС на основе предложенной методики и выполнить их исследование с помощью созданного программного комплекса.

Объектом исследования являются микрологистические транспортные системы, процесс функционирования которых является случайным в силу воздействия большого числа неопределенных факторов природного и техногенного характера.

Предметом исследования являются методы построения математических моделей микро-ЛТС с групповым поступлением заявок на основе теории

массового обслуживания и численные методы их исследования.

Научная новизна исследования состоит в следующем.

1. Разработана новая методика создания математических моделей работы микро-ЛТС, новизна которой состоит в том, что для описания входящего материального потока используется Batch Markovian Arrival Process (далее – *ВМАР*), а также учитывается многофазная структура микро-ЛТС с наличием обратных связей между фазами. В области транспорта подобный модельный аппарат применяется впервые, близкие модели ранее встречались в области информационно-телекоммуникационных систем
2. Предложен оригинальный численный метод оценки параметров работы многофазной СМО с групповым поступлением заявок на основе имитационного моделирования. Его отличие от известных методов заключается в возможности генерирования *ВМАР*-потоков с заданными характеристиками.
3. Создан новый «Программный комплекс для моделирования и расчетов параметров систем массового обслуживания», который реализует предложенный численный метод и позволяет решать широкий спектр модельных и прикладных задач, и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.
4. С использованием разработанной методики построены стохастические модели работы железнодорожной (грузовой) и городской (пассажирской) микро-ЛТС в виде многофазных СМО с *ВМАР*-потоками. С помощью созданного программного комплекса получены оценки параметров работы этих СМО, сделаны новые содержательные выводы о рассмотренных транспортных системах, в частности, определены «узкие места» в структуре микро-ЛТС и выработаны рекомендации по их устранению.

Теоретическая значимость исследования. Полученные в настоящем исследовании результаты вносят вклад в развитие теории массового обслуживания и могут быть основой дальнейшего изучения более сложных СМО, например, с большим числом фаз либо с существенно нестационарными потоками.

Основные научные результаты по теме диссертации использованы при выполнении грантов РФФИ: № 13-06-00653 «Исследование проблем модернизации и оптимизации транспортной сети с использованием методов теории гиперграфов и гиперсетей, ГИС-анализа», № 14-07-00222 «Интеллектуальная система поддержки принятия решений в задачах инфраструктурной логистики», № 16-06-00464 «Методический инструментарий оценки устойчивости и эффективности развития макрорегиональной транспортно-логистической системы с использованием математического моделирования», № 18-07-00604 «Интеллектуальная информационно-вычислительная технология поддержки принятия решений в задачах инфраструктурной микро и мезо логистики».

Практическая значимость результатов исследования определяется тем, что разработанная методика построения математических моделей может быть применена для анализа характеристик реальных объектов, когда необходимо учитывать влияние случайных факторов. Это позволяет снизить трудозатраты при проведении первичного исследования различных транспортных систем в сравнении

с другими методами, в частности, основанными на агентных моделях или клеточных автоматах. Созданный программный комплекс применим для определения параметров работы различных по структуре и назначению микро-ЛТС.

Методы исследования. В диссертационной работе применяются методы теории массового обслуживания, теории случайных процессов, методы математического и имитационного моделирования, теории вероятностей, математической статистики и системного анализа. Для реализации программной системы используются дискретно-событийный подход имитационного моделирования и среда разработки Delphi EX8 (язык программирования Object Pascal).

Соответствие специальности. Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.18: п.1. «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений» – в части применения многофазных СМО с групповым входящим потоком заявок для описания работы микро-ЛТС; п.4. «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента» – в части разработки численного метода оценки параметров работы многофазной СМО и его программной реализации; п.5. «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» – в части решения модельных и прикладных задач из области транспортной логистики. Полученные результаты обладают научной новизной для всех трех областей: математического моделирования, численных методов и комплексов программ.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность результатов работы определяется корректностью применения методов теории вероятностей, теории случайных процессов, математической статистики и теории массового обслуживания, корректностью выбора условий для построения моделей и исходных данных для проведения численного эксперимента, верификацией результатов расчетов на реальных данных.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Винеровские чтения» (Иркутск, 2014, 2015, 2016); конференции «Ляпуновские чтения» (Иркутск, 2016, 2017, 2018); III Российско-Монгольской конференции молодых ученых по математическому моделированию, вычислительно-информационным технологиям и управлению (Иркутск–Ханх, 2016); XX Байкальской всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (Иркутск–Байкал, 2015); XVII, XVIII и XIX Всероссийских конференциях молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (Новосибирск, 2016; Иркутск, 2017; Кемерово, 2018); Объединенном научном семинаре Центра развития и размещения производственных сил ИЭ УрО РАН и кафедры «Мировая экономика и логистика» УрГУПС под руководством д.т.н. М.Б. Петрова (Екатеринбург, 2018); международном семинаре «Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-based, Cloud Computing and Cyber Security» (Байкальск – Иркутск, 2018) и научных семинарах в ИДСТУ СО РАН.

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 научная работа, из них 2 статьи [1, 2] в изданиях, индексируемых в Web of Science, и 2 статьи [3, 4] в издании, входящем в Перечень ВАК РФ по профилю диссертации, в которых представлены основные положения проведенного исследования. Статьи [5-8] – в изданиях по транспорту, входящих в перечень ВАК РФ, в них опубликованы результаты по применению разработанного в диссертации программно-математического аппарата для исследования конкретных транспортных систем. Оставшиеся работы опубликованы в трудах и материалах конференций. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Все выносимые на защиту результаты получены лично автором. Предложенная методика создания математических моделей работы микро-ЛТС [1, 3, 5] разработана в неделимом соавторстве с д.ф.-м.н. А.Л. Казаковым. Исследование структуры микро-ЛТС [1, 2, 6, 7] проведено при участии к.ф.-м.н. А.А. Лемперт. Постановка задачи моделирования транспортно-пересадочного узла в Екатеринбурге принадлежит к.т.н. М.А. Журавской [2, 5]. Статистические данные для построения модели входящего вагонопотока на ж/д станцию собраны П.А. Парсюровой [3]. «Программный комплекс для моделирования и расчетов параметров систем массового обслуживания» [1, 4, 5] создан в соавторстве с д.ф.-м.н. А.Л. Казаковым. Вклад соискателя состоит в проектировании архитектуры, разработке алгоритмического обеспечения и программной реализации.

Лично соискателем разработаны: в [6] – численно-аналитический метод оценки вероятностных характеристик многофазных СМО, в [1, 4, 5, 7-9] – математическая модель работы микро-ЛТС и численный метод оценки параметров работы многофазной СМО с групповым поступлением заявок.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 179 наименований и приложения. Объем работы составляет 191 страниц, включая 34 рисунка и 44 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы его цель и задачи, раскрыта научная новизна, охарактеризована теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведена структура работы.

В первой главе проведен аналитический обзор научных исследований по построению и изучению математических моделей различных транспортно-логистических систем. В зависимости от масштаба выделяют макро-, мезо- и микрологистические системы. К последним и относится объект исследования – микрологистические транспортные системы.

Под микро-ЛТС понимаются подсистемы, структурные составляющие логистических систем, которые охватывают работу отдельного предприятия. В сферу деятельности таких систем входит внутрипроизводственная логистика какого-либо объекта, т.е. подготовка и планирование производства, транспортно-складские, погрузочно-разгрузочные работы и др.

В ходе анализа установлено, что микро-ЛТС испытывают существенное влияние случайных факторов (случайный характер поступления транспорта, недетерминированное время обслуживания и др.). В этой связи наиболее адекватным в большинстве случаев оказывается применение вероятностных (стохастических) моделей.

Изучение структуры современных микро-ЛТС и особенностей производимых ими операций показало следующее. Во-первых, функционирование микро-ЛТС можно представить в виде случайного процесса¹ с дискретными состояниями и непрерывным временем, т.е. использовать модель СМО. Во-вторых, входящие транспортные потоки имеют сложную структуру: одновременно могут поступать несколько независимых потоков транспорта с различными параметрами, например, с произвольным распределением числа заявок в группе.

В связи с вышесказанным, было изучено современное состояние исследований в области теории массового обслуживания, в частности, известные модели входящего потока заявок, из которых для целей исследования наиболее перспективным оказался *ВМАР*-поток. Последний представляет собой одно из возможных обобщений простейшего (пуассоновского) потока на случай, когда заявки поступают группами.

ВМАР-поток (Batch Markovian Arrival Process^{2,3}) отличается от простейшего потока с групповым поступлением заявок тем, что а) интенсивность поступления групп заявок зависит от номера состояния управляющей цепи Маркова (ЦМ) v_t с непрерывным временем и конечным пространством состояний $\{0, 1, \dots, W\}$; б) время пребывания ЦМ v_t в состоянии v имеет показательное распределение с параметром λ_v , $v = \overline{0, W}$; в) после того, как время пребывания цепи в состоянии v закончится, ЦМ с заданной вероятностью $p_k(v, v')$ переходит в другое состояние v' , $v' = \overline{0, W}$, и при этом генерируется группа заявок размера $k \geq 0$; г) вероятности переходов $p_k(v, v')$ удовлетворяют условию $\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{v'=0}^W p_k(v, v') = 1$ для $v = \overline{0, W}$.

D.M. Lucantoni предложил представление *ВМАР*-потока в виде набора матриц D_k , $k \geq 0$, размера $(W+1) \times (W+1)$, которые определяются следующим образом: $(D_k)_{v,v'}$ – (v, v') -й элемент матрицы D_k имеет вид

$$(D_0)_{v,v'} = \begin{cases} \lambda_v p_0(v, v'), & v \neq v', v, v' = \overline{0, W}, \\ -\lambda_v, & v = v', v = \overline{0, W}, \end{cases} \quad (D_k)_{v,v'} = \lambda_v p_k(v, v'), v, v' = \overline{0, W}, k \geq 1.$$

Вследствие сложности изучения СМО, наряду с аналитическим исследованием, необходимо использовать также и методы имитационного моделирования. В связи с этим, в заключительном разделе первой главы представлен обзор работ по решению прикладных задач с помощью указанного подхода и дана характеристика современных инструментальных средств для реализации имитационных моделей.

Во второй главе строятся модели входящих потоков заявок в различные

¹ Случайным процессом $X(t)$ называется процесс, значение которого при любом фиксированном $t = t_0$ является случайной величиной.

² Lucantoni D.M. New results on single server queue with a batch Markovian arrival process // Stochastic Models. – 1991.

³ Дудин А.Н., Клименок В.И. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. – Мн.: БГУ, 2000.

микро-ЛТС, основанные на модели *ВМАР*-потока. Статистические данные для моделирования получены по результатам натуральных обследований, выполненных автором лично, либо при его участии. Часть имеющихся данных использовалась для идентификации моделей, остальные – для их верификации путем сравнения с результатами моделирования по Т-критерию Вилкоксона.

В п. 2.1 строится предметная модель входящего материального (грузового, пассажирского) потока в микро-ЛТС и проводится выбор математического аппарата для ее описания.

Поскольку в рамках данной работы микро-ЛТС рассматривается как самостоятельный элемент транспортно-логистической системы, значимыми параметрами, учитываемыми в предметной модели, являются: вид транспорта, время его прибытия в систему и количество перевозимых грузов (пассажиров).

Установлено, что входящий в систему материальный поток является сложным, т.е. состоит из транспортных потоков различных видов, каждый из которых характеризуется произвольными распределениями моментов поступления транспорта в систему и количества перевозимых им грузов (пассажиров). Показано, что для математического описания таких потоков адекватной и универсальной моделью оказался *ВМАР*-поток.

В п. 2.2 строится стохастическая, имеющая вид *ВМАР*-потока, модель поступающего на железнодорожную станцию вагонопотока. В модели объединены два типа входящих потоков: пассажирский и грузовой. При этом каждый поток имеет индивидуальные характеристики: законы распределения числа вагонов в прибывающей группе и времени между поступлением групп. Числовые параметры получены по результатам анализа статистических данных, собранных в 2013 г. на одной из промежуточных железнодорожных станций, которая находится на главном ходу Транссибирской железнодорожной магистрали.

В п. 2.3 строятся стохастические модели общего входящего пассажиропотока в транспортно-пересадочные узлы мегаполиса в виде *ВМАР*-потоков. С помощью модельного эксперимента установлены значения интенсивностей поступления групп заявок для входящих *ВМАР*-потоков, при которых количество заявок, получаемое при разыгрывании созданных моделей входящего пассажиропотока, соответствует ожидаемому показателю числа прибывающих в транспортно-пересадочные узлы пассажиров в час пик в 2025 г. Статистические данные для идентификации моделей собраны автором путем натурального наблюдения в 2017 г.

Полученные во второй главе результаты в дальнейшем использованы для решения прикладных задач, которые представлены в пятой главе.

В третьей главе предложена методика создания математических стохастических моделей работы микро-ЛТС, имеющих вид многофазных СМО с групповым поступлением заявок. Приведены результаты аналитического исследования некоторых частных случаев и численно-аналитический метод нахождения стационарных вероятностей состояний, возникающих СМО.

В п. 3.1 предлагается методика построения математических моделей работы микро-ЛТС.

Структура микро-ЛТС включает три последовательно расположенные

подсистемы, в которых происходит обслуживание поступающих транспортных потоков:

- приемно-распределительная подсистема обеспечивает прием, сортировку, расформирование и подачу транспорта под погрузку и разгрузку;
- подсистема обслуживания осуществляет разгрузку и погрузку прибывшего транспорта, упаковку и пакетирование груза, обслуживание пассажиров;
- подсистема отправки обеспечивает отправку транспорта из системы.

Подсистемы имеют технические характеристики: число обслуживающих устройств; их тип, т.е. какой вид транспорта, тип грузов или направление пассажиропотока они могут обрабатывать; количество грузов (пассажиров), которые могут находиться в подсистеме, т.е. ее вместимость.

Между подсистемами имеются прямые и обратные связи. Прямые определяют последовательность передачи материальных потоков между подсистемами, обратные связи – выбор поведения системы при изменяющихся условиях, в частности, при перегрузках. Подсистемы имеют несколько обслуживающих устройств и ограниченную вместимость для принятия грузов (пассажиров), допускается их групповое обслуживание.

Также установлено, что на микро-ЛТС оказывает воздействие столь большое число второстепенных факторов, как внешних, так и внутренних, что практически невозможно зарегистрировать и учесть их все. К таким факторам относятся природные (различные погодные условия) и техногенные (сбои в работе техники, человеческий фактор и др.) воздействия. В модели их влияние учитывается тем, что поступление транспорта в микро-ЛТС и технические операции, которые выполняются в ней, считаются случайными процессами, в частности, время обслуживания грузов (пассажиров) является случайной величиной.

Для рассмотренных микро-ЛТС в рамках указанной методики выделяются две стадии построения математических моделей (рис. 1).

На первой стадии выполняется анализ структуры и описание входящих потоков заявок в микро-ЛТС с помощью *ВМАР* модели (глава 2).

На второй стадии изучаются структура и процессы функционирования системы: движение внутренних потоков заявок и их обработка, выполняется математическое описание.

В построенной модели микро-ЛТС заявки могут находиться на трех фазах обслуживания:

Фаза 1 – принятие групп заявок и дальнейшее направление их в систему;

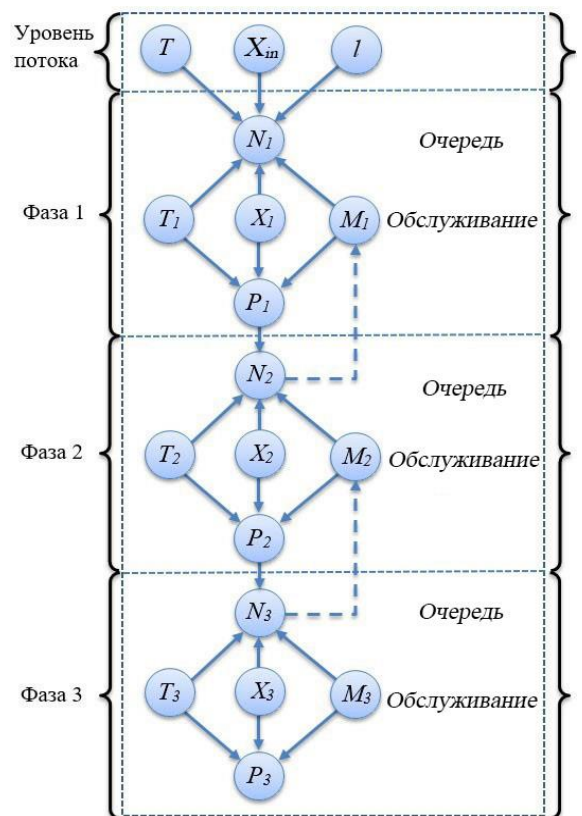


Рис. 1. Структурная схема математической модели работы микро-ЛТС

Фаза 2 – обработка заявок специализированными каналами;

Фаза 3 – формирование исходящего потока заявок, где определяются параметры исходящего потока заявок и характеристики работы модели.

Каждая фаза описывается набором случайных величин: T, T_1, T_2, T_3 – законы распределения времен между поступлениями групп заявок; X_{in}, X_1, X_2, X_3 – законы распределения размеров поступивших групп; законы распределения M_k – числа работающих каналов и N_k – длины очереди на соответствующей фазе $k = \overline{1,3}$, P_k – исходящий поток заявок из фазы $k = \overline{1,3}$.

Между первой, второй и третьей фазами имеются обратные связи, т.е. происходит блокировка каналов предыдущей фазы в случае отсутствия свободных мест для принятия группы заявок в текущей.

Параметрическая идентификация осуществляется в зависимости от особенностей конкретной задачи.

На основе данной методики была создана стохастическая модель работы микро-ЛТС в виде многофазной СМО, которая имеет следующие особенности:

- входящие в систему заявки образуют *ВМАР*-поток;
- система состоит из трех последовательно расположенных фаз, каждая имеет очередь размера n_k , а также m_k обслуживающих каналов $m_k, n_k < \infty, k = \overline{1,3}$;
- фаза может включать одну общую очередь, либо отдельные очереди перед каждым каналом;
- для определения маршрута движения заявки через систему используются разные типы заявок;
- каждому каналу присваивается определенный тип, канал может обслуживать заявки только аналогичного типа;
- каналы первой и второй фазы могут блокироваться, чтобы не допустить потерю заявок между фазами;
- группы заявок принимаются согласно дисциплине полного отказа (*complete rejection*): если не хватает места хотя бы для одной заявки из группы, то теряется вся группа заявок;
- дисциплина обслуживания очереди *FIFO* (первый вошел, первый вышел);
- время обслуживания заявки на каждой фазе является случайной величиной;
- на каждой фазе допускается групповое обслуживание.

В терминах теории массового обслуживания имеем открытую СМО типа $ВМАР / G^{X_1} / m_1 / n_1 \rightarrow / G^{X_2} / m_2 / n_2 \rightarrow / G^{X_3} / m_3 / n_3$, где X_k – максимальный размер обслуживаемой группы или закон распределения размера обслуживаемой группы на фазе k , G – произвольный закон распределения времени обслуживания, m_k – число каналов и n_k – максимальная длина очереди на фазе k .

В проведенном исследовании рассматривалась дисциплина обслуживания очереди *FIFO*, которая наиболее часто встречается в микро-ЛТС. Другие виды дисциплин обслуживания очереди (*LIFO*, *Random*, приоритетные и др.) в рамках диссертационной работы не рассматривались, так как они встречаются достаточно редко, кроме того, в изученных модельной и прикладных задачах *FIFO* является естественной дисциплиной обслуживания очереди.

При построении и исследовании моделей в виде СМО ключевую роль играют стационарные вероятности состояний системы, зная которые можно рассчитать показатели эффективности СМО: абсолютную пропускную способность, вероятность обслуживания группы заявок, вероятность отказа, среднее время пребывания заявки в системе, среднее число занятых каналов и др.

Возникающая при моделировании СМО имеет сложную структуру (три фазы с блокировками, групповое поступление, произвольный закон распределения времени обслуживания на каждой фазе), поэтому определить аналитически ее стационарные характеристики в общем случае не удастся. По этой причине на ее основе строится имитационная модель, которая описана в главе 4. Тем не менее, для ряда частных случаев получены аналитические результаты, представленные в п. 3.2.

В п. 3.2.1 для открытых многоканальных СМО с конечной очередью и групповым поступлением получены рекуррентные формулы для отыскания коэффициентов a_i , которые входят в формулу вычисления стационарной вероятности $p_0 = (a_0 + a_1 + a_2 + \dots + a_N)^{-1}$ нахождения системы в состоянии S_0 , т.е. когда в системе заявки отсутствуют. Остальные стационарные вероятности p_i , $i = 1, 2, \dots, N$ определяются из соотношений $p_i = p_0 a_i$. Отметим, что для СМО с дисциплиной полного отказа вероятность отказа в обслуживании группы заявок рассчитывается по следующей формуле: $P_{loss} = p_N + \sum_{i=1}^v b_{i+1} p_{N-i}$, где b_i – вероятность поступления группы заявок размера i , v – максимальный размер групп заявок.

В п. 3.2.2 рассматриваются открытые многофазные СМО. Получены рекуррентные соотношения для вычисления коэффициентов $a_{i,j}$, входящих в формулы для определения стационарных вероятностей, для следующих частных случаев двухфазных СМО с блокировками: $M/M/1/0 \rightarrow M/M/1/n$ и $M/M/1/n \rightarrow M/M/1/0$, где $n < \infty$ максимальная длина очереди. Кроме того, в данном пункте представлены рекуррентные формулы нахождения матричных коэффициентов $A_{i,j}$ для частных случаев двухфазных СМО с *МАР*-потокотом (частный случай *ВМАР*-потока).

В п. 3.3 предложен численно-аналитический метод определения стационарных вероятностей многофазных СМО с групповым потоком заявок. Данный метод применим к открытым системам типа $M^X/M/m_1/n_1 \rightarrow M/M_2/n_2 \rightarrow \dots$, т.е. когда в многофазной СМО имеется $u > 1$ фаз, $N_j = m_j + n_j > 1$ мест в фазе j , $j = \overline{1, u}$, время поступления групп заявок и обслуживания подчиняются экспоненциальному распределению.

Построенная система уравнений равновесия для двухфазной СМО с поступлением групп заявок случайного размера имеет вид

$$\begin{aligned}
 & p_{i,j} \left[\sum_{k=1}^{\min(v, N_1-i)} \lambda_k + \min(i, m_1) \mu_1 + \min(j, m_2) \mu_2 \right] = \\
 & = \sum_{k=1}^{\min(v,i)} \lambda_k p_{i-k,j} + \min(i+1, m_1) \mu_1 p_{i+1,j-1} + \min(j+1, m_2) \mu_2 p_{i,j+1}, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{1, N_2}; \\
 & p_{1b, N_2} \left[\sum_{k=1}^{\min(v, N_1-1)} \lambda_k + m_2 \mu_2 \right] = \mu_1 p_{1, N_2}; \\
 & p_{ib, N_2} \left[\sum_{k=1}^{\min(v, N_1-i)} \lambda_k + m_2 \mu_2 \right] = \sum_{k=1}^{\min(v,i)} \lambda_k p_{(i-k)b, N_2} + \min(i, m_1) \mu_1 p_{i, N_2}, \quad i = \overline{2, N_1}.
 \end{aligned}$$

Здесь m_u – число каналов и n_u – длина очереди на фазе u ; v – максимальный размер поступающей группы; λ_k – интенсивность поступления группы заявок размера k ; $p_{i,j}$ – вероятность нахождения в системе i заявок на фазе 1 и j заявок на фазе 2; p_{ib,N_2} – вероятность блокировки каналов фазы 1; $p_{i,j} = 0$, если выполняется хотя бы одно из условий: $i < 0, i > N_1+2, j < 0$ или $j > N_2+2$.

Данные формулы справедливы для различных СМО с заданным числом каналов и конечной длиной очереди на каждой фазе, а также со случайным размером поступающих групп заявок.

Также построена система уравнений равновесия для открытой трехфазной СМО с поступлением групп заявок случайного размера.

В четвертой главе приведены принципы построения имитационной модели для многофазной СМО и ее программная реализация, представлено описание программного комплекса и выполнена проверка его работоспособности. Верификация имитационной модели проведена путем тестирования программного комплекса на классических задачах теории массового обслуживания.

В п. 4.1 описываются принципы построения имитационной модели работы многофазной СМО, а также представлены основные управляющие функции и алгоритм ее работы. Имитационная модель реализована автором в виде программного модуля, входящего в состав программного комплекса.

В п. 4.2 представлена структура и описание основных функций созданного программного комплекса. Комплекс имеет модульную архитектуру, состоит из трех программных модулей, создан в среде разработки Delphi EX8 на языке программирования Object Pascal.

В п. 4.2.1 приводится описание *модуля имитационного моделирования*. Данный модуль позволяет имитировать работу многофазных СМО различной сложности, приближенно рассчитывать стационарные вероятности состояний системы, определять показатели эффективности и проводить многовариантные сценарные расчеты.

В п. 4.2.2 описывается *модуль вычисления стационарных вероятностей состояний СМО*. В модуле программно реализованы результаты аналитического изучения СМО, которые представлены в п. 3.2 и 3.3 диссертационной работы. Данный программный модуль позволяет получить основные характеристики систем, такие как вероятность отказа, среднее число занятых каналов, средняя длина очереди и др.

В п. 4.2.3 рассмотрен *модуль генерации случайных величин*. Основная задача данного модуля – генерация необходимого пользователю набора случайных величин с заданными параметрами, проверка выборки случайных величин на соответствие наиболее распространенным законам распределения, а также уточнение параметров выбранного закона распределения. Уточнение последних проводится методом покоординатного спуска по комбинированному критерию, который основан на критериях Пирсона и Колмогорова-Смирнова.

В п. 4.3 приведены результаты решения тестовых и модельной задач, которые используются для проверки работоспособности созданного программного комплекса. На первом этапе осуществляется сравнение показателей эффективности СМО, полученных с помощью имитационной модели, с

известными результатами. Рассматривались задачи трех типов: m -канальная система с отказами – классическая задача теории массового обслуживания (задача Эрланга), m -канальная система с групповым поступлением, где размер групп заявок равен двум, и трехфазная система с блокировками. Для двух последних задач результаты расчетов сравнивались с решениями, которые были получены с помощью численно-аналитического метода из п. 3.3. Установлено, что для задач всех типов максимальная относительная погрешность не превосходит 4%. На втором этапе имитируется работа железнодорожной сортировочной станции Свердловской железной дороги. Для данного объекта изучены показатели работы при различных интенсивностях поступления поездов, на основе чего установлена максимально допустимая интенсивность поступления вагонопотока, при которой вероятность отказа в обслуживании равна нулю.

В пятой главе созданный программный комплекс используется для решения прикладных задач.

В п. 5.1 рассматриваются структура транспортно-пересадочных узлов (ТПУ) и их классификация. На основе предложенной в главе 3 методики создана обобщенная стохастическая модель работы ТПУ. Основное отличие заключается в применении к базовой структуре микро-ЛТС (п. 3.1) специального алгоритма движения пассажиров сквозь терминал ТПУ.

В терминах теории массового обслуживания обобщенная стохастическая модель работы ТПУ запишется в виде открытой СМО типа

$$M/M/n_1/m_1 \rightarrow M/n_2/m_2 \rightarrow G^X/n_3/m_3,$$

где X – размер обслуживаемой группы, M – экспоненциальное распределение времени обслуживания.

Обобщенная модель работы ТПУ имеет особенность: наличие нескольких независимых одноканальных СМО с различными параметрами и очередями на третьей фазе.

В п. 5.2 строятся стохастические модели ТПУ «Владыкино» и «Кутузово» (г. Москва). Технические характеристики этих объектов были получены по натурному обследованию лично автором, по данным официальной статистики, включая официальный сайт Московского метрополитена. Данные системы выбраны по следующим причинам: во-первых, по ним имелись некоторые открытые данные о пассажиропотоках, во-вторых, они представляют собой типичные ТПУ, в их структуру включен терминал; в-третьих, они являются одними из наиболее загруженных на Московском центральном кольце (среднесуточный поток на конец 2016 г. составлял 18,3 и 14,9 тыс. чел., соответственно). В ТПУ поступают пассажиропотоки, M/M -модели которых построены в п. 2.3.

В терминах теории массового обслуживания модель ТПУ «Владыкино» будет иметь вид $M/M/19/1500 \rightarrow M/19/9500 \rightarrow G^X/3/7500$, модель ТПУ «Кутузово» – $M/M/18/1500 \rightarrow M/18/2000 \rightarrow G^X/3/5000$.

Представлены результаты многовариантных расчетов, на основании которых установлены эксплуатационные характеристики при планируемом уровне загрузки (на 2025 г.), максимально допустимые значения входящего пассажиропотока, а также определены узкие места в структуре обоих изучаемых

объектов. Выработаны рекомендации по устранению узких мест и улучшению параметров работы с точки зрения минимизации среднего времени нахождения заявки в системе для рассмотренных ТПУ.

В п. 5.3 проведено исследование возможности включения метрополитена в планируемый ТПУ в г. Екатеринбурге. Статистические данные для проведения исследования были получены коллегами из Екатеринбурга по натурному обследованию транспортных потоков на основных въездах в город. Модель планируемого ТПУ представлена в виде трехфазной СМО с групповым входящим потоком заявок (*ВМАР*), в терминах теории массового обслуживания она имеет следующий вид: $ВМАР / M / 6 / 2000 \rightarrow / M / 10 / 200 \rightarrow / D^x / 1 / 1500$, где D – детерминированное время обслуживания.

По результатам моделирования установлено, что пропускной способности метрополитена достаточно для перевозки пассажиров в часы пик. При более чем двукратном увеличении пассажиропотока от предполагаемого уровня загруженность метрополитена не достигает порогового значения. Таким образом, метрополитен может быть включен в структуру планируемого ТПУ без модернизации.

Разработанная стохастическая модель пригодна для общей оценки эффективности функционирования, текущего уровня работы, максимально допустимой нагрузки и определения узких мест в структуре различных микро-ЛТС. В модели учитывается неравномерность входящего потока, размера поступающих групп заявок, случайный характер обслуживания на каждой фазе. Таким образом, стохастическая модель работы микро-ЛТС является удобным и эффективным инструментом для исследования различных по структуре пассажирских и грузовых микрологистических транспортных систем.

В заключении приводятся основные научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработана новая методика создания математических моделей работы микрологистических транспортных систем в виде многофазных систем массового обслуживания с групповым поступлением заявок.
2. Построены стохастические модели входящих потоков заявок в грузовую и пассажирские микро-ЛТС в виде *ВМАР*-потоков.
3. Предложен оригинальный численный метод оценки параметров работы многофазной СМО с групповым поступлением заявок на основе имитационного моделирования.
4. Создан новый «Программный комплекс для моделирования и расчетов параметров систем массового обслуживания», который реализует предложенный численный метод и позволяет решать широкий спектр модельных и прикладных задач.
5. На основе предложенной методики построены стохастические модели работы железнодорожной (грузовой) и городской (пассажирской) микро-ЛТС в виде многофазных СМО с *ВМАР*-потоками. С помощью созданного программного комплекса получены оценки параметров работы этих СМО.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, индексируемых в Web of Science

1. Zharkov, M.L. A Stochastic Model of a Transport Hub and Multi-phase Queueing Systems / A.L. Kazakov, A.A. Lempert, M.L. Zharkov // *Advances in Intelligent Systems Research*. – 2018. – V. 158. – P.117–123. DOI:10.2991/iwci-18.2018.21. ISSN: 1951–6851.
2. Zharkov, M. Issues of Sustainable Urban Mobility Simulation / M. Zhuravskaya, A. Lempert, N. Anashkina, M. Zharkov // *Business Logistics in Modern Management*. – 2018. – P. 439–452. ISSN: 1849–5931.

Статьи в журналах из перечня ВАК по профилю диссертации

3. Жарков, М.Л. Моделирование работы станций и участков железнодорожной сети на основе изучения отклонений от графика движения / М.Л. Жарков, П.А. Парсюрлова, А.Л. Казаков // *Вестник ИрГТУ*. – 2014. – Т. 53, № 6. – С. 23–31.
4. Жарков, М.Л. Математическая модель и программный комплекс для определения статистических параметров пассажиропотоков в транспортных системах / М.Л. Жарков // *Вестник ИрГТУ*. – 2018. – Т. 22, № 2. – С. 45–56.

Статьи в журналах из перечня ВАК по транспорту

5. Жарков, М.Л. Моделирование работы транспортно-пересадочного узла мегаполиса как трехфазной системы массового обслуживания / М.А. Журавская, А.Л. Казаков, М.Л. Жарков, П.А. Парсюрлова // *Транспорт Урала*. – 2015. – № 3 (46). – С. 17–22.
6. Жарков, М.Л. Моделирование транспортно-пересадочных узлов на основе систем массового обслуживания – многофазных и с *ВМАР*-поток / М.Л. Жарков, А.Л. Казаков, А.А. Лемперт // *Вестник УрГУПС*. – 2016. – № 4 (32). – С. 4–14.
7. Жарков, М.Л. Определение критических показателей работы транспортно-пересадочного узла на основе многофазной системы массового обслуживания / М.Л. Жарков, А.Л. Казаков, А.А. Лемперт // *Вестник УрГУПС*. – 2017. – № 3 (35). – С. 40–52.
8. Жарков, М.Л. Применение многофазных систем массового обслуживания для моделирования сортировочной станции / А.Л. Казаков, М.М. Павидис, М.Л. Жарков // *Вестник УрГУПС*. – 2018. – № 2 (38). – С. 4–14.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

9. Программный комплекс для моделирования и расчетов параметров систем массового обслуживания: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 12 декабря 2016 г. № 2016663545 / М.Л. Жарков, А.Л. Казаков. М. : Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2016.

Подписано в печать 15.04.2019. Формат 60x90/15.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в типографии БГУ

Адрес: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина 11