

УДК 004.9

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-912-917

ОБЩЕЕ В ПОДХОДЕ К ИМИТАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ

О.И. Кутузов^a, Т.М. Татарникова^{a,b}

^a Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ) им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

^b Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

Адрес для переписки: Tm-tatarn@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 01.07.19, принята к печати 31.07.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Общее в подходе к имитационному моделированию инфокоммуникационных и транспортных сетей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 912–917. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-912-917

Аннотация

Предмет исследования. Продемонстрировано сходство процессов организации транспортировки в инфокоммуникационной сети, выполняющей доставку данных своим абонентам, и транспортной сети, выполняющей функцию перевозок. Показано, что в структурно-функциональном отношении имеется практически полное совпадение по назначению элементов инфокоммуникационной сети и транспортной сети, есть совпадения по постановке задач, решаемых на сетях при макро моделировании, и для многих объектов аналогичны модели. **Используемые подходы.** Модельное обеспечение инфокоммуникационных сетей как сложного стохастического объекта исследования может быть адаптировано для транспортной сети при решении задач оценки распределения транспортных потоков на сети и маршрутизации транспорта, выявления чрезвычайных ситуаций и узких мест в сети с целью их своевременной ликвидации. **Основные результаты.** Предложена трехуровневая концептуальная модель, демонстрирующая сходство организации транспортировки в инфокоммуникационной и транспортной сетях. Приведены соответствия элементов инфокоммуникационной и транспортной сетей по их функциональному назначению. Предложено использовать аналитико-статистическое моделирование совместно с ускоренным моделированием при проектировании транспортных сетей. **Практическая значимость.** Появление межотраслевых моделей позволит решать задачи оптимизации методов и структуры управления производственным процессом в различных прикладных областях.

Ключевые слова

инфокоммуникационная сеть, транспортная сеть, структурно-функциональное сходство элементов, межотраслевая модель, сложная стохастическая система, аналитико-имитационное моделирование, ускоренное моделирование

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-912-917

COMMON GROUND BETWEEN APPROACHES TO SIMULATION MODELING OF INFOCOMMUNICATION AND TRANSPORT NETWORKS

O.I. Kutuzov^a, T.M. Tatarnikova^{a,b}

^a Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

^b Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Corresponding author: Tm-tatarn@yandex.ru

Article info

Received 01.07.19, accepted 31.07.19

Article in Russian

For citation: Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. Common ground between approaches to simulation modeling of infocommunication and transport networks. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 912–917 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-912-917

Abstract

Subject of Research. The paper demonstrates the similarity of the traffic organization in the information and communication network that performs data delivery to its users and the transport network that performs the transport function. It is shown that almost complete similarity for elements of the information and communication network and the transport network is in structural and functional terms; there are similarities in the formulation of tasks being solved on networks during macro modeling, and the

models are equivalent for many objects. **Methods.** Model support of information and communication networks as a complex stochastic object of research can be adapted for the transport network when solving assessment problems of the traffic flows distribution to the networks and transport routing, identification of emergencies and bottlenecks in the network with the aim of their well-timed deletion. **Main Results.** A three-level conceptual model is proposed, which demonstrates the similarity of the transportation organization in the infocommunication network and the transport network. The correspondences of the elements of the infocommunication network and the transport network according to their functional purpose are given. Analytical and statistical modeling is proposed for applying in conjunction with accelerated modeling in the design of transport networks. **Practical Relevance.** The occurrence of inter-sectoral models provides for solving optimization problems for the methods and structure of production management in various application areas.

Keywords

infocommunication network, transport network, structural and functional elements similarity, inter-sectoral model, complex stochastic system, analytical and simulation modeling, accelerated modeling

Введение

В практической деятельности имитационное моделирование как эффективная рабочая технология, применяется при решении широкой группы управленческих задач: производственного менеджмента, отраслевых проектов, информационных бизнес-системах, оптимизации режимов управления технологическими (логистическими, коммуникационными) системами, на государственном и территориальном управлении [1].

Имитационное моделирование универсальный метод. Однако при решении задач из разных прикладных отраслей имеют место различия, относящиеся к выбору того или иного набора базовых математических и программных объектов.

Готовые имитационные модели стоят больших финансовых затрат. Сроки их изготовления значительны.

Назрела необходимость построения комплекса межотраслевых моделей для решения задач оптимизации методов и структуры управления производственным процессом в различных прикладных областях [2].

С этой точки зрения просматривается значительное сходство, например, процессов организации передачи сообщений в инфокоммуникационных сетях (ИКС) и процессов доставки грузов в транспортных сетях. Следовательно, средства имитационного моделирования, разработанные для анализа решений по инфокоммуникационным сетям, могут быть использованы и при решении задач в области транспортных сетей.

Покажем эту аналогию.

Сходство процессов организации транспортировки в ИКС и транспортной сети

Обобщенно функциональную архитектуру информационной сети можно представить в виде трехуровневой концептуальной модели [3] (рисунок):

— первый уровень (внутренний) описывает функции и правила взаимосвязи через физические каналы передачи (каналы связи) и реализуется транспортной сетью;

— второй уровень (промежуточный) описывает функции и правила обмена информацией в интересах взаимосвязи прикладных процессов различных абонентских систем и реализуется инфокоммуникационной сетью. ИКС представляет собой единую инфраструктуру для обмена различными видами информации в интересах пользователей информационной сети;

— третий уровень (внешний) образуется совокупностью прикладных процессов (ПП), размещенных в территориально удаленных абонентских системах (терминалы, локальные сети).

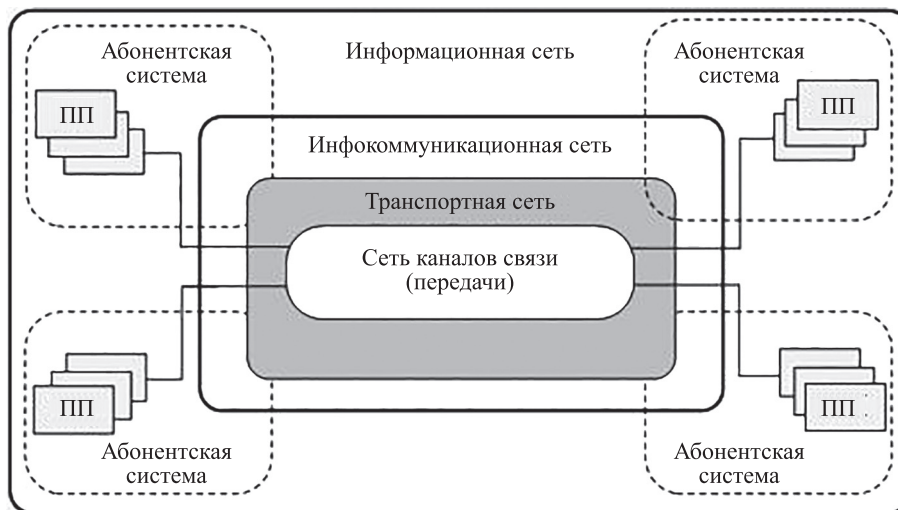


Рисунок. Концептуальная модель информационной сети

Связь абонентских систем с ИКС есть функция сетей абонентского доступа.

Абонентские системы подключаются к ИКС либо непосредственно, либо через сеть абонентского доступа.

В роли элементов информационной сети выступают информационные и прикладные процессы.

Ядром представленной модели является ИКС, обеспечивающая взаимодействие удаленных процессов.

Неопределенность обстоятельств, с которыми приходится сталкиваться в реальности, позволяет отнести ИКС к классу сложных стохастических систем.

Соответственно на этапах проектирования, модернизации, эксплуатации информационных сетей возникает большое количество проблем, связанных с исследованием механизмов внутрисетевых взаимодействий, с формулировкой соответствующих требований к сети и ее отдельным компонентам и разработкой алгоритмов управления сетью.

Анализ подобных проблем требует соответствующего модельного обеспечения.

Аналогичные задачи имеют место и для транспортных сетей. Транспортные сети есть результат слияния отраслей и предприятий, которые непосредственно выполняют перевозки.

В роли элементов транспортной сети выступают логистические ключевые и поддерживающие операции.

Ключевые логистические операции обеспечивают непосредственно реализацию процессов транспортировки грузо- и пассажиропотоков и ряд других стандартов обслуживания потребителей.

Поддерживающие логистические операции реализуют прикладные процессы: погрузки, разгрузки, комплектации, складирования, распределения, затаривания, информационно-компьютерную поддержку [4].

По аналогии с концептуальной моделью ИКС (рисунок) инфраструктуру транспортной сети также можно представить тремя уровнями:

— первый уровень (внутренний) включает в себя подвижной состав и стационарные устройства всех видов транспорта, обеспечивающего перевозки по сети региональных магистральных дорог, национальных и транснациональных коридоров;

— второй уровень (промежуточный) описывает функции и правила взаимосвязи логистических операций, непосредственно связанных с организацией и управлением материальными потоками, и реализуется транспортной сетью. Транспортная сеть представляет собой единую инфраструктуру, обеспечивающую сопряженность участников транспортного логистического процесса в транспортной цепочке;

— третий уровень (внешний) образуется совокупностью источников и получателей грузов, размещенных в территориально удаленных объектах.

Третий уровень, дополняя первый и второй с функциями транспортировки грузов, образует внешний облик транспортной системы.

Транспортные сети экономических районов слагаются из магистральных и примыкающих к ним внутрирайонных путей для осуществления местных связей, а также для межрегиональных перевозок.

Наиболее эффективные решения в сфере транспортирования грузов реализуются созданием транспортных коридоров и транспортных цепей [5, 6].

Транспортный коридор как часть национальной или международной транспортной системы включает коммуникации различных видов транспорта и альтернативные маршруты, региональные ответвления и другие звенья российской транспортной сети.

Подобную структуру и назначение для передачи сообщений в ИКС имеет виртуальный канал.

В большинстве случаев транспортные коридоры создаются на базе коммуникаций железнодорожного и автомобильного транспорта для осуществления перевозок по принципу «движущегося шоссе» при перемещении контейнеров, роудрейлеров и т. п. по схеме «автомобиль–железная дорога–автомобиль». Автомобильный транспорт обеспечивает подвоз грузов к магистральному транспорту (железнодорожному) и доставку их получателям от пунктов назначения магистрального транспорта; перевозки внутри узлов в контейнерах и мелкими отправлениями.

Необходимость сопряженности участников транспортного логистического процесса в транспортной цепочке потребовала унификации транспортной «тары» перевозок, введения понятия грузовой единицы [4]. Целям логистики отвечают пакетные, контейнерные единицы.

Отметим, по месту, в ИКС для передачи сообщений применяют протокольные единицы: пакеты, кадры.

Логистические операции с материальными потоками в сфере обращения, помимо транспортировки, представляют собой операции погрузки, разгрузки, комплектации, складирования, распределения, затаривания и перевалки грузов. Эти операции выполняются в транспортных узлах магистральных каналов и транспортных коридоров и исследуются в рамках транспортно-складской логистической концепции.

Склады создаются как в начале и в конце материальных потоков, так и могут располагаться на любом участке товарного потока.

Склады играют активную роль в процессах поддержания, преобразования и формирования грузопотоков, изменяя параметры принимаемых и выдаваемых партий грузов (по размеру, составу, физическим характеристикам входящих грузов, времени отправки транспортных партий и т. д.) [7].

Функциональную деятельность складов характеризуют, как стохастическую. Данное свойство усиливается неравномерностью и динамичностью поставок, обуславливающих специфику входных потоков и заказов, предопределяющих особенности выходных потоков [2].

С аналогичными процессами по обработке потоков пакетов, кадров имеют дело в узлах коммутации ИКС (как окончательных, так и промежуточных).

Подход к построению моделей процессов в транспортных сетях

Логистика ориентирована на изучение потоковых процессов в транспортных системах с учетом времени и сроков доставки грузов [4].

Время перемещения потока по выбранному навигатором маршруту зависит не только от объема этого потока, но и от потоков, направляемых по тому же маршруту другими навигаторами.

Кроме того, загруженность на различных участках дороги зависит от внутренних транспортных потоков, частично использующих выделенный маршрут.

Сама сеть дорог может быть описана в виде случайного графа, поскольку наличие внутренних транспортных потоков на каждом участке сети носит вероятностный характер. Такие потоки могут рассматриваться как помехи при передвижении выделенной транспортной единицы. Соответственно модель транспортной магистрали может быть представлена последовательностью участков исследуемого пути (маршрута) с учетом влияния на выделенный поток внутренних («фоновых») потоков.

Такая модель разработана и используется для анализа вероятностно-временных характеристик виртуальных каналов в ИКС [8, 9].

Эффективное управление транспортной сетью фактически сводится к долгосрочному и краткосрочному планированию (в частности, составлению расписания) перевозок, а также оперативному управлению. В условиях повышенной загрузки ограниченных мощностей дорожных сетей крайне актуальной является задача оценки распределения транспортных потоков на сети и маршрутизации транспорта, выявления чрезвычайных ситуаций и узких мест в сети с целью их своевременной ликвидации.

С аналогичными задачами имеют дело и при структурно-функциональном анализе ИКС.

Для решения названных логистических задач по оптимизации (рационализации) транспортных систем применяют аналитические и статистические методы, а также методы математического моделирования [2].

Наличие случайных факторов, влияющих на состояние транспортной сети, затрудняет решение перечисленных задач с использованием аппарата, основанного на аналитических моделях [10].

Развитие моделей прогноза транспортных потоков в основном идет по пути усложнения алгоритмов [11]. Однако для целей долгосрочного планирования требуются более простые модели, в частности, не требующие излишней (неизвестной на ранних стадиях планирования) детализации параметров транспортной системы [4].

В качестве выхода из положения исследователи вынуждены прибегать к имитационному моделированию транспортных потоков в сети дорог с учетом случайных факторов.

Имитационное моделирование представляется мощным инструментом для оценки и анализа движения транспортных и пешеходных потоков. Кроме того, некоторые программы [10] позволяют в значительной мере упростить работу проектировщика и создают достоверную платформу для проектирования дорожно-транспортных объектов.

Приведенный анализ показывает, что в структурно-функциональном отношении имеется практически полное совпадение по назначению элементов инфокоммуникационной сети и транспортной сети: унифицированные единицы транспортировки как сообщений (пакет, кадр), так и материальных потоков (пакет, контейнер, роудрейлер), виртуальных каналов ИКС с транспортными коридорами, буферных накопителей в узлах ИКС и складов в транспортных узлах. Задачи, решаемые на сетях при макромоделировании, совпадают по постановке, аналогичны модели для многих объектов.

Эти соображения позволяют методы и модели ускоренной имитации в задачах разработки ИКС предложить и для решения транспортных задач (таблица).

Таблица. Модели инфокоммуникационной сети, предлагаемые для решения транспортных задач

Объект		Модель
Инфокоммуникационная сеть	Транспортная сеть	
Сеть	Сеть	Случайный граф
Логический канал	Транспортный коридор	Модель виртуального канала
Транзитный узел	Транспортный узел	Трехфазная система массового обслуживания
Буфер	Склад	Модель конечного буфера

Единство парадигм имитационного моделирования

Имитационное моделирование как метод исследования основано на том, что анализируемая динамическая система заменяется имитатором и с ним производятся эксперименты для получения сведений об изучаемой системе. Роль имитатора зачастую выполняет программа ЭВМ.

Прежде чем объект моделирования будет отображен программной имитационной моделью, для него формируется концептуальная модель и формализованное представление объекта в виде адекватной математической схемы.

Применение различных математических схем на этапе формализаций привело к тому, что современными технологиями имитационного моделирования охватываются четыре «парадигмы» — четыре самостоятельных подхода: дискретно-событийное моделирование, динамическое моделирование, системная динамика в смысле Форрестера и мультиагентный подход [12].

Во всех четырех версиях имитационного моделирования симулятор-двигатель продвигает вперед системное время и создает на каждом очередном шаге текущий временной слой системы. Этот слой содержит сведения о возможных ближайших предстоящих и последних произошедших изменениях и для рекуррентного пересчета показателей. Этот принцип моделирования и является сущностью компьютерного имитационного моделирования.

Следовательно, все четыре «парадигмы», по сути, просто разные реализации имитационного моделирования, разные подходы к построению траекторий смены состояний. Все они используют причинно-следственный механизм продвижения процессов во времени. Различия относятся лишь к выбору того или иного набора базовых математических и программных объектов. Логика имитации процессов одинакова.

Технология имитационного моделирования сложных стохастических систем реализуется с привлечением метода статистических испытаний (метод Монте-Карло). Известный недостаток метода Монте-Карло заключается в его медленной сходимости, которая особенно проявляется при моделировании редких событий и в задачах большой размерности.

И здесь актуальным становится проблема ускорения имитационного моделирования за счет сокращения количества численных экспериментов.

Ускорение может достигаться:

- а) за счет соответствующего аналитического преобразования решаемой задачи [8, 9];
- б) путем организации параллельных вычислений и распределенного моделирования [13].

Теоретической основой ускорения являются методы расслоенной выборки [14], равновзвешенного моделирования [15], элементы теории экстремальных статистик [16].

Предложенный подход к декомпозиции сети сохраняет взаимообусловленность параметров и процессов всей сети при имитационном моделировании конкретного маршрута [17].

Представленные в [8–18] решения задач связаны с оценкой надежностных, временных и ресурсных характеристик сетей и их элементов. Имитационная модель виртуального канала является базовым элементом, задающим единообразие модельного обеспечения структурно-функционального анализа проектных вариантов сети [3, 17]. В [3, 19] приведен материал по особенностям расчета буферной емкости коммутирующих устройств.

В настоящее время опубликованы описания по многим имитационным системам, которые представляют собой библиотеки готовых программ, например, такие как ИСТРА, AnyLogic, GPSS, Arena и другие. Однако методы, обеспечивающие ускорение имитационных экспериментов, в таких системах не предусмотрены.

Заключение

Аналитико-имитационное моделирование позволяет получать решения, близкие к оптимальным для систем, с которыми реально приходится иметь дело инженерам, управленцам, экономистам и многим другим категориям профессионалов.

Так, например, в соответствии с задачами Транспортной стратегии в России должна быть создана единая интегрированная комплексная сбалансированная транспортная система. Решение этой стратегической задачи невозможно без математического моделирования транспортных сетей и потоков. Основной трудностью на пути решения этой проблемы является большая размерность (сложность) модели, помноженная на высокую степень неопределенности исследуемых процессов. Решения, приведенные в [7, 8, 11], позволяют эффективно преодолевать как «проклятие размерности» аналитических численных методов, так и высокую «цену точности» имитационного моделирования.

Литература

1. Лычкина Н.Н. Имитационные модели организаций и их применение в стратегическом управлении и информационных бизнес-системах // *Управленческие науки в современной России*. 2014. Т. 2. № 2. С. 396–400.
2. Слободянюк М.Э. Моделирование транспортных систем. М.: Горячая линия-Телеком, 2017. 296 с.

References

1. Lychkina N.N. Simulation models of organizations and their application in strategic management and information business systems. *Management Sciences in Russia*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 396–400. (in Russian)
2. Slobodyanyuk M.E. *Modeling of transport systems*. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2017, 296 p. (in Russian)

3. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Инфокоммуникационные сети. Моделирование и оценка вероятностно-временных характеристик: монография. СПб.: ГУАП, 2015. 382 с.
4. Потапова И.А., Бояршинова И.Н., Исмагилов Т.Р. Методы моделирования транспортного потока // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 10-2. С. 338–342.
5. Garichev S.N., Gorbachev R.A., Volkov D.O. Construction of Automatic Control System above Ground Transport by H-Bahn Technology: Concept, Initial Data and Statement Objectives // *Proc. 7th International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT 2014)*. 2014. P. 59–62. doi: 10.1109/EnT.2014.29
6. Горев А.Э. Теория транспортных процессов и систем. М.: Издательство Юрайт, 2017. 217 с.
7. Волков Д.О., Гаричев С.Н., Горбачев Р.А., Мороз Н.Н. Математическое моделирование загрузки транспортной сети для определения целесообразности строительства новых видов транспортных систем // *Труды МФТИ*. 2015. Т. 7. № 3. С. 69–76.
8. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технология. СПб.: КОРОНА принт, 2015. 380 с.
9. Кутузов О.И. Моделирование систем. Методы и модели ускоренной имитации в задачах телекоммуникационных и транспортных сетей. СПб.: Издательство «Лань», 2018. 132 с.
10. Ivanov D. Operations and Supply Chain Simulation with AnyLogic. Berlin: Berlin School of Economics and Law, 2017. 97 p.
11. Кинько В.М., Бесценный И.П. Моделирование транспортных сетей с помощью раскрашенных взвешенных сетей Петри // *Математические структуры и моделирование*. 2015. № 1(33). С. 56–62.
12. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. К анализу парадигм имитационного моделирования // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2017. Т. 17. № 3. С. 552–558. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-552-558
13. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Надежность мультикластерных систем с перераспределением потоков запросов // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2017. Т. 60. № 2. С. 171–177. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-2-171-177
14. Kleijnen Jack P. *Statistical Techniques in Simulation*. M. Dekker, 1974, 775 p.
15. Plaks B.I. Calculation of the reliability of systems with a complex structure by the accelerated Monte Carlo method. *Izv. AN SSSR. Tekhn. Kibernetika*, 1983, no. 6, pp. 158–162. (in Russian)
16. Galambos J. *The asymptotic theory of extreme order statistics*. Wiley, 1973, 352 p.
17. Татарникова Т.М., Елизаров М.А. Имитационная модель виртуального канала // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. Т. 16. № 6. С. 1120–1127. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1120-1127
18. Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V., Bogatyrev V.A. Analysis of the Timeliness of Redundant Service in the System of the Parallel-Series Connection of Nodes with Unlimited Queues // *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. (WECONF 2018)*. 2018. P. 8604379. doi: 10.1109/WECONF.2018.8604379
19. Tatarnikova T., Kutuzov O. Model of a self-similar traffic generator and evaluation of buffer storage for classical and fractal queuing systems // *Proc. 1st Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT 2018)*. 2018. P. 1–3. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337306
3. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. *Infocommunication Networks. Simulation and Evaluation of Probability-Time Characteristics*. St. Petersburg, SUAI Publ., 2015, 382 p. (In Russian)
4. Potapova I.A., Boyarshinova I.N., Ismagilov T.R. Methods of traffic flows modeling. *Fundamental research*, 2016, no. 10-2, pp. 338–342. (In Russian)
5. Garichev S.N., Gorbachev R.A., Volkov D.O. Construction of Automatic Control System above Ground Transport by H-Bahn Technology: Concept, Initial Data and Statement Objectives. *Proc. 7th International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT 2014)*, 2014, pp. 59–62. doi: 10.1109/EnT.2014.29
6. Gorev A.E. *Theory of transport processes and systems*. Moscow, Yurayt Publ., 2017, 217 p. (in Russian)
7. Volkov D.O., Garichev S.N., Gorbachev R.A., Moroz N.N. Mathematic simulation of transport network load with a view to assessing viability of building new types of network systems. *Proceedings of MIPT*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 69–76. (in Russian)
8. Ryzhikov Yu.I. *Simulation modeling. Theory and technology*. St. Petersburg, KORONA print Publ., 2015, 380 p. (in Russian)
9. Kutuzov O.I. Modeling systems. *Methods and models of accelerated simulation in the problems of telecommunication and transport networks*. St. Petersburg, Lan Publ., 2018, 132 p. (in Russian)
10. Ivanov D. *Operations and Supply Chain Simulation with AnyLogic*. Berlin, Berlin School of Economics and Law, 2017, 97 p.
11. Kinko V.M., Bestsenyi I.P. Traffic network modeling with timed cooured Petri nets. *Mathematical Structures and Modeling*, 2015, no. 1(33), pp. 56–62. (in Russian)
12. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. On the simulation paradigm analysis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 552–558. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-552-558
13. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. Reliability of multi-cluster systems with redistribution of the flow of requests. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 171–177. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-2-171-177
14. Kleijnen Jack P. *Statistical Techniques in Simulation*. M. Dekker, 1974, 775 p.
15. Plaks B.I. Calculation of the reliability of systems with a complex structure by the accelerated Monte Carlo method. *Izv. AN SSSR. Tekhn. Kibernetika*, 1983, no. 6, pp. 158–162. (in Russian)
16. Galambos J. *The asymptotic theory of extreme order statistics*. Wiley, 1973, 352 p.
17. Tatarnikova T.M., Elizarov M.A. Virtual channel simulation model. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 6, pp. 1120–1127. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1120-1127
18. Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V., Bogatyrev V.A. Analysis of the Timeliness of Redundant Service in the System of the Parallel-Series Connection of Nodes with Unlimited Queues. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. (WECONF 2018)*, 2018, pp. 8604379. doi: 10.1109/WECONF.2018.8604379
19. Tatarnikova T., Kutuzov O. Model of a self-similar traffic generator and evaluation of buffer storage for classical and fractal queuing systems. *Proc. 1st Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT 2018)*, 2018, pp. 1–3. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337306

Авторы

Кутузов Олег Иванович — доктор технических наук, профессор, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-9318-6454, kutuzov-oleg@mail.ru

Татарникова Татьяна Михайловна — доктор технических наук, доцент, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, Scopus ID: 36715607400, ORCID ID: 0000-0002-6419-0072, Tm-tatarn@yandex.ru

Authors

Oleg. I. Kutuzov — D.Sc., Full Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-9318-6454, kutuzov-oleg@mail.ru

Tatiana M. Tatarnikova — D.Sc., Associate Professor, Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation; Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, Scopus ID: 36715607400, ORCID ID: 0000-0002-6419-0072, Tm-tatarn@yandex.ru