

© Ф.Г. Фу¹, А.Л. Казаков²¹Иркутский государственный технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.²Институт динамики систем и управления СО РАН,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

Построена математическая модель, описывающая грузовые транспортные терминалы. На ее основе предложен подход к имитационному моделированию работы указанных объектов и создана реализующая данный подход программная система, с помощью которой проведена серия вычислительных экспериментов для модельных и прикладных задач. Результаты работы позволяют высказать рекомендации по совершенствованию организации и планированию работы транспортных узлов.

Ил. 7. Табл. 1. Библиогр. 9 назв.

Ключевые слова: математическое моделирование; система массового обслуживания; имитационная модель; вычислительный эксперимент; грузовой терминал; железнодорожный транспорт.

SIMULATION MODELING OF CARGO TRANSPORT TERMINALS OPERATION**F.G. Fu, A.L. Kazakov**

Irkutsk State Technical University,

83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

Institute of System Dynamics and Control SB RAS,

134 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

Having built a mathematical model describing freight transport terminals the authors proposed an approach to simulate the operation of these facilities and created a software system that implements this approach. The software system enabled to carry out a series of numerical experiments for the model and applied problems. The results of the work allowed to make recommendations on improvement of transport hub organization and planning.

7 figures. 1 table. 9 sources.

Key words: mathematical modeling; queuing system; simulation model; computational experiment; cargo (freight) terminal; railway transport.

Введение

Системы массового обслуживания (СМО) являются распространенной математической моделью для описания многих технических, биологических и других систем. Важнейшим элементом всех таких систем являются входящие потоки некоторых событий, которые поступают на обслуживающие приборы, занимая их на некоторое время для своего обслуживания, и затем или покидают систему, или уходят на другой обслуживающий прибор. Наиболее простыми и хорошо изученными моделями такого рода являются марковские СМО, отличительной чертой которых является то, что поток заявок и поток обслуживания являются про-

стейшими, т.е. обладают свойствами ординарности, стационарности и отсутствия последействия [1]. В реальных системах эти требования, как правило, не выполняются, однако для СМО, не являющихся марковскими, полноценная теория пока не построена, аналитических результатов известно немного [2]. Основным инструментом их исследования является вычислительный эксперимент и на основе имитационного моделирования [3].

Имитационное моделирование – один из самых мощных инструментов исследования сложных систем, управление которыми связано с принятием решений в условиях неопределенности, в частности, СМО. По

¹Фу Фуюк Гуй, аспирант, тел.: 89248322309, e-mail: phuphuochuy@gmail.com

Fu Phuoc Gui, Postgraduate, tel.: 89248322309, e-mail: phuphuochuy@gmail.com

²Казаков Александр Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории математических методов анализа свойств динамических систем, тел.: 89140043391, e-mail: kazakov@icc.ru

Kazakov Alexander, Doctor of Physical and Mathematical sciences, Professor, Leading Researcher at the Laboratory of Mathematical Analysis Methods for Dynamical Systems Properties, tel.: 89140043391, e-mail: kazakov@icc.ru



сравнению с другими методами такое моделирование позволяет рассматривать больше вариантов, улучшать качество управленческих решений и точнее прогнозировать их последствия [4]. Целью настоящей работы является развитие методов теории систем массового обслуживания, имитационного моделирования и применение полученных результатов для решения задач транспорта.

Известно, что транспорт как инфраструктурная отрасль обеспечивает базовые условия жизнедеятельности и развития государства и общества. В последние годы значительно возросла системообразующая роль транспорта и повысилась взаимосвязь задач его развития с приоритетами социально-экономических преобразований. При достижении цели развитие современной и эффективной транспортной инфраструктуры, обеспечивающей ускорение товародвижения и снижение транспортных издержек в экономике [5], предусматривается реализация комплекса инвестиционных проектов по развитию транспортных магистралей и транспортных узлов, обеспечивающих основные межрегиональные связи и формирование единого транспортного пространства. Решение таких задач невозможно без математического моделирования.

В данной работе строится имитационная модель работы грузового транспортного узла, в предположении о случайном характере процессов поступления и обработки грузов. Программный модуль, который создан на основе модели, позволяет провести численные эксперименты и высказать рекомендации по планированию работы в грузовых транспортных узлах после многовариантных сценарных расчетов. В ходе исследования развиты методы моделирования и оценки работы СМО, не являющихся марковскими.

Описание работы грузового транспортного узла

Известно, что в грузовом транспортном узле происходит преобразование входного потока

в выходной (рис. 1) [6]. Транспортный узел представляется в виде некоторого грузового терминала с разветвленной структурой для переработки потоков и при расчете его перерабатывающей (пропускной) способности. Пропускная способность узла зависит от качества структуры терминала, от технологии функционирования и от характеристик входящего потока (неравномерности, его структуры и т.п.).

Нами рассматриваются терминалы, на которых происходит процессы поступления, выгрузки и вывоза грузов. Входной поток является случайным, при этом заявки (в отличие от известных моделей марковских СМО [1-3]) предполагаются сложными, состоящими из нескольких простых заявок (будем далее называть такие заявки «мультизаявками»). Подобное предположение уместно, например, применительно к грузовым железнодорожным терминалам, когда каждая заявка (подача) состоит из нескольких «подзаявок» (вагонов). Заявки поступают в терминал и занимают свои очереди, ожидая обслуживания. Грузы, поступившие в канал, обрабатываются и далее направляются на склад. Время выгрузки зависит от типа грузов и работоспособности бригад [7] и предполагается случайным [8]. Со склада грузы выгружаются в автомобили, образуя выходной отток, который может носить как случайный, так и детерминированный характер. Если склад полон или в очереди ожидания нет свободных мест, то терминал прекращает прием грузов. Таким образом, мы имеем случайный процесс со сложной многоуровневой структурой. Исследовать подобный процесс аналитически, по-видимому, не представляется возможным. Поэтому авторами была создана имитационная модель, о которой пойдет речь в следующем разделе.

Об имитационной модели

На рис. 2 представлена структура имитационной модели.

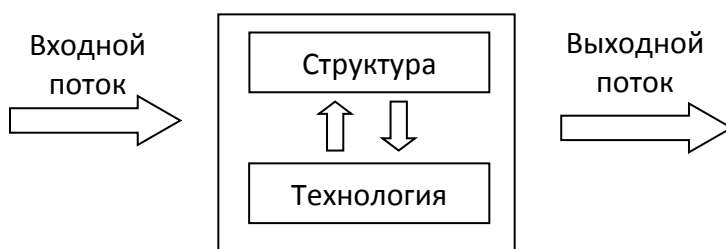


Рис. 1. Взаимодействие потока и функциональной структуры



Рис. 2. Структура имитационной модели



Имитационная модель строится на следующих принципах:

- Входящий поток мультизаявок является простейшим (время поступления мультизаявки в систему подчиняется показательному закону распределения), либо детерминированным (т.е. грузы поступают по расписанию). Мультизаявка состоит из трех различных типов заявок, при этом количество заявок каждого типа одинаковое, общее же число заявок в мультизаявке распределено по нормальному (или биномиальному) закону.

- Система обслуживания имеет m мест очереди и n каналов обслуживания. При построении данной модели предполагается, что все каналы имеют одинаковые условия работы, и время обслуживания подчиняется показательному закону распределения (для каждого типа заявок – своя интенсивность обслуживания).

- Если количество заявок в мультизаявке не превосходит числа свободных мест в очереди, то мультизаявка принимается в очередь целиком. В противном случае вся мультизаявка получает отказ.

- Заявка принимается в канал к обслуживанию, когда канал свободен. После окончания обслуживания канал освобождается, но он не сразу способен принять другую заявку к обслуживанию (по техническим причинам), поэтому после окончания обслуживания одной заявки до принятия другой существует время задержки (межоперационный простой).

- Обслуженные заявки поступают на склад, а потом заявки выгружаются со склада в грузовые автомобили. Процесс выгрузки подчиняется показательному закону распределения, либо является детерминированным (грузы вывозятся по расписанию). Через время t_A объем склада снимается и объем снижения равен грузоподъемности автомобиля V_A .

- В зависимости от свободного объема склада определяется количество работающих каналов обслуживания: если склад полный, то каналы обслуживания не работают и в системе происходит только процесс выгрузки со склада; если свободный объем склада меньше 10% от общего объема склада, то количество работающих каналов обслуживания равно 1; если он меньше 20% от общего объема склада, то количество работающих каналов обслуживания равно 2 и т.п. Иначе говоря, каналы обслуживания имеют четыре возможных состояния: 1) работает; 2) не работает (из-за занятости склада); 3) технологический про-

стой; 4) свободен (канал готов принять заявку к обслуживанию, но в очереди заявок нет).

Принципы построения имитационной модели определяют наличие следующих функций управления процессами:

- $F_{ВО}$ – функция генерирования времени поступления;

- F_3 – функция генерирования числа заявок в мультизаявке;

- $F_{ПО}$ – функция проверка состояния очереди;

- $F_{ПК}$ – функция проверка состояния каналов;

- $F_{ВК}$ – функция управления поступлением заявок в канал;

- $F_{ПС}$ – функция проверка состояния склада.

- $F_{ВВС}$ – функция генерирования времени обслуживания в каналах.

- $F_{ВСС}$ – функция генерирования времени выгрузки грузов со склада.

Схема функционирования имитационной модели представлена на рис. 3.

В результате разыгрывания имитационной модели могут быть исчерпывающие данные о параметрах работы грузового терминала с заданными характеристиками без проведения натурных экспериментов. Последнее очень важно, так как подобные исследования являются сложными и дорогостоящими. Полученные данные могут быть применены для моделирования для синтетического планирования грузовых терминалов [9].

Имитационная модель была реализована авторами в виде программной системы, описание которой приведено в следующем разделе.

Программная реализация

На основе вышеизложенной имитационной модели создан программный модуль имитации работы грузовых терминалов (ИРГТ) в рамках разрабатываемой авторами программной системы ModForT. Модуль ИРГТ выполняет следующие функции: генерирование времени поступления мультизаявок; разыгрывание количества заявок в каждой мультизаявке; мониторинг состояния системы (в т.ч. очереди, каналов обслуживания и склада); отображение процесса выгрузки в графическом и табличном видах; отображение текущих и итоговых статистических данных по работе имитационной модели; сохранение результата в *.xls файл.

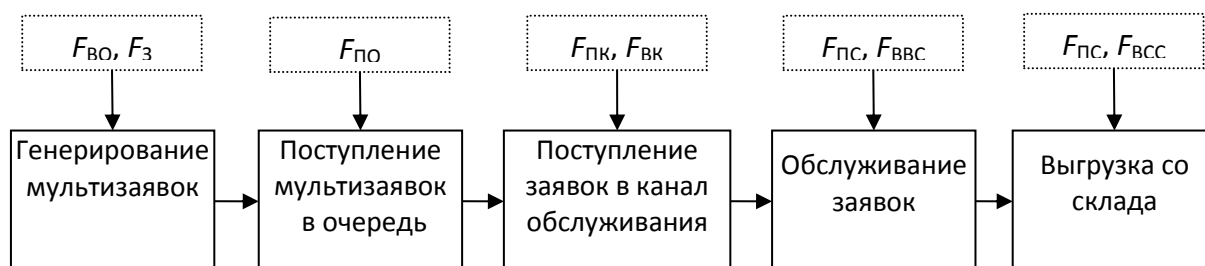


Рис. 3. Схема функционирования имитационной модели

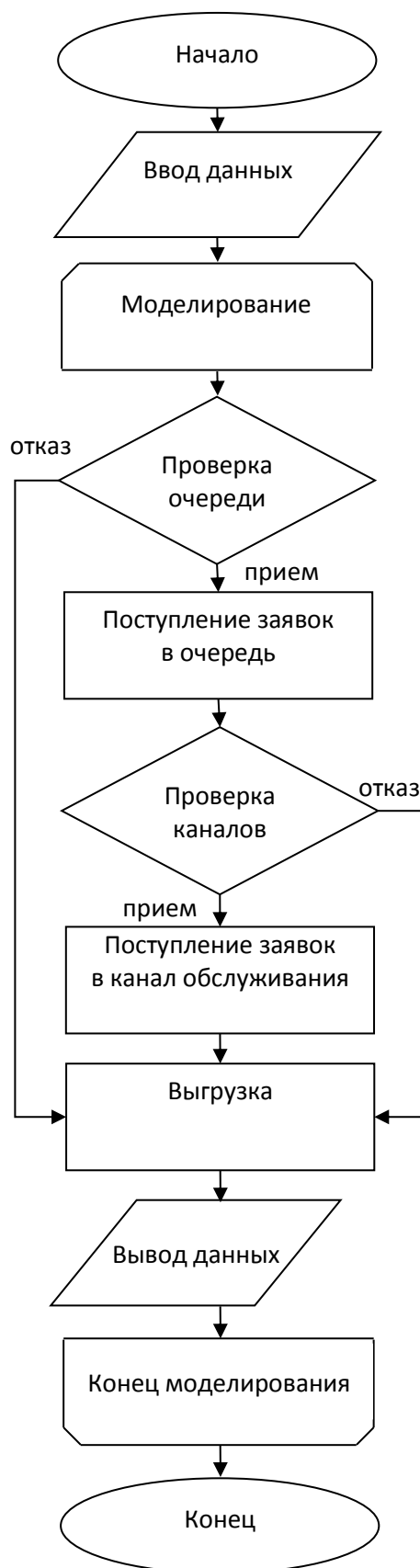


Рис. 4. Блок-схема программной системы

Для моделирования конкретного терминала имеется ряд настроечных параметров, задаваемых пользователем, сгруппированных по назначению.

1. Параметры терминала: количество мест в очереди, количество каналов обслуживания, вид и параметры закона распределения времени обслуживания



заявок различных типов (показательный, нормальный), продолжительность межоперационного простоя;

2. Параметры входящего потока заявок: вид и параметры закона распределения времени поступления мультизаявок (нормальный; показательный; подача по расписанию, например, через равные промежутки времени; подача по готовности к принятию) и количества заявок в них (нормальный, равномерный), количество различных типов заявок в мультизаявке и ожидаемое число заявок каждого типа (в % от общего числа).

3. Параметры склада: объем склада, грузоподъемность автомобилей, вывозящих груз со склада (измеряются в заявках), средний интервал выгрузки.

Блок схема программы представлена на рис. 4. Скорость моделирования может быть изменена во время моделирования. Результатам моделирования находят отражение в трех видах информации, которые мы условно назовем «усредненной», «статистической» и информацией «реального времени».

Усредненная информация – среднее количество принятых, отказанных мультизаявок (в % от общего количества заявок), среднее количество заявок в каждой мультизаявке, среднее число занятых каналов, среднее время ожидания в очереди, среднее время обслуживания и некоторые другие параметры.

Статистическая информация о всех мультизаявках – это время поступления, количество и тип подзаявок, а также состояние системы в момент поступления (количество занятых мест в очереди и каналов, заполнение склада). При этом информация о принятых и не принятых мультизаявках сохраняется в отдельных таблицах. Статистическую и табличную информацию можно сохранить в *.xls файл.

Информация реального времени – графическое представление текущего состояния транспортного терминала. Очередь представлена в виде последовательности маленьких прямоугольников. Если свет прямоугольника красный, то место занято. Если зеленый – место свободно. Каналы обслуживания представлены кругами. Если круг красный – канал занят, желтый – канал находится в состоянии технологиче-

ского простоя, зеленый – канал свободен и готов принять заявку и черный – канал не работает, так как склад переполнен. Склад представлен большим прямоугольником, зеленая часть которого свободна, а красная – занята.

Интерфейс программной системы представлен на рис. 5.

Показатели эффективности функционирования СМО

Как уже отмечалось, аналитическое определение характеристик работы описанной выше СМО, по-видимому, невозможно из-за ее сложности – подобная ситуация является для немарковских СМО скорее правилом, нежели исключением [1–3]. Поэтому коэффициенты немарковских процессов определяются приближенно результатам работы программного модуля.

Основными характеристиками функционирования СМО в каждый момент времени являются: общее количество принятых мультизаявок ($k_{i\delta}$); общее количество мультизаявок, получивших отказ ($k_{i\delta}$); общее количество принятых в очередь заявок ($k_{i\delta}$); общее количество заявок, получивших отказ ($k_{i\delta}$); общее количество, поступивших в каналы обслуживания (k_e); общее количество обслуженных заявок (k_{an}). Указанные параметры фиксируются через равные промежутки времени. Далее на их основе вычисляются: среднее время ожидания в очереди ($\bar{t}_{\delta}$); среднее время обслуживания ($\bar{t}_{an}$); среднее время пребывания заявки в СМО ($\bar{t}_{\delta i}$); средняя длина очереди ($\bar{m}$); средняя интенсивность входного потока заявок ($\bar{\lambda}$); относительная пропускная способность (Q); вероятность отказа ($P_{i\delta e}$); среднее число занятых каналов ($\bar{z}$).

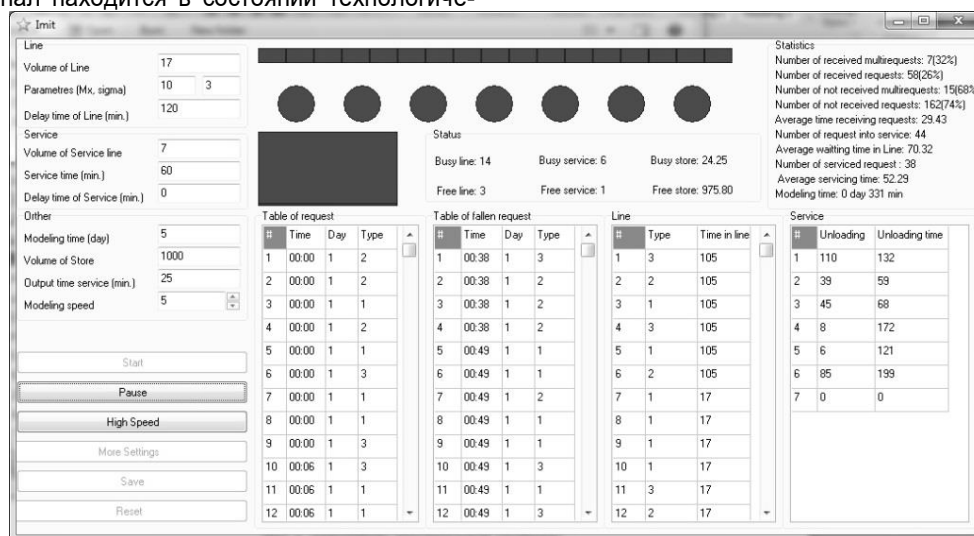


Рис. 5. Интерфейс программной системы

**Вычислительный эксперимент**

Пусть длина очереди для прибытия железнодорожных составов равна 14, имеется 5 бригад обслуживания. Интенсивность прибытия железнодорожных составов распределяется по показательному закону с параметрами $\alpha_1 = 150$ (минут), количество вагонов в составе распределяется по нормальному закону с параметрами $\alpha_2 = 10$ и $\sigma = 3$. Время обслуживания будем считать распределенным по показательному закону. Среднее время обслуживания одного вагона 60 минут. Все вагоны в составе одинаковые типы. Данная станция является модельной, однако ее характеристики близки к характеристикам действующей грузовой железнодорожной станции, принадлежащей компании Вьетнамские железные дороги (Đường sắt Việt Nam).

Требуется 1) найти коэффициенты СМО по результатам работы программного модуля; 2) найти зависимость коэффициентов СМО при изменении числа каналов, при изменении длины очереди и при измене-

нии характеристик входящего потока.

Результаты моделирования работы станции в течение пяти дней представлены в таблице (за единицу измерения времени взята одна минута).

Из таблицы видно, что система работает неудовлетворительно (это согласуется с реальным положением дел на станции, которая была источником информации).

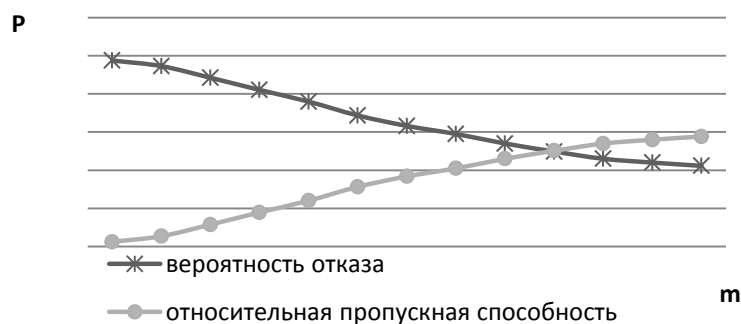
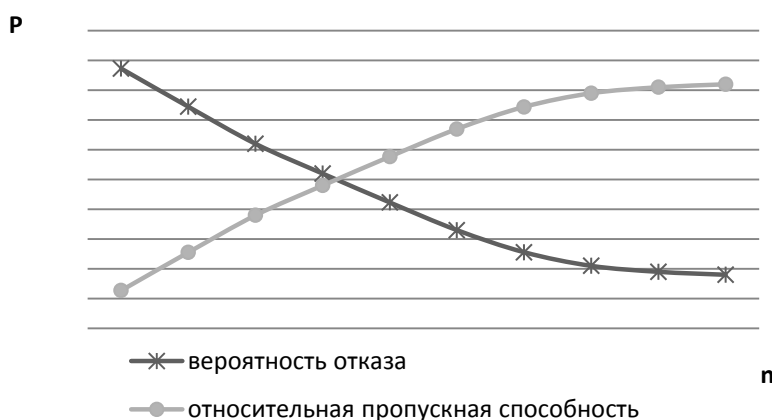
Наиболее простым и естественным способом улучшения качества (сокращения времени ожидания и уменьшения вероятности отказа) обслуживания является в данном случае увеличение количества бригад, занимающихся разгрузкой (т.е. числа каналов обслуживания), еще одним возможным средством уменьшения вероятности отказа является увеличение количества мест в очереди.

На рис. 6 показана зависимость вероятностей отказа и обслуживания ($P_{i\partial\epsilon}$ и Q) от числа каналов.

На рис. 7 показывается зависимости $P_{i\partial\epsilon}$ и Q от длины очереди.

Характеристики работы станции за пять дней

$k_{i\bar{i}\partial}$	$k_{i\bar{i}\partial}$	$k_{i\bar{i}\partial}$	$k_{i\bar{i}\partial}$	k_{ϵ}	$k_{i\bar{i}\partial}$	$\bar{t}_{i\bar{i}\partial}$
42	35	394	385	389	387	58,23
$\bar{t}_{\bar{m}i}$	$\bar{m}$	$\bar{\lambda}$	Q	$P_{i\partial\epsilon}$	$\bar{z}$	$\bar{t}_{i\bar{a}}$
123,58	9,32	0,29	0,51	0,49	3,13	65,35





Из рис. 7 видно, что при увеличении количества каналов обслуживания от одного до семи вероятность отказа уменьшается (а относительная пропускная способность – увеличивается) практически линейно. Далее скорость уменьшения (увеличения) резко снижается. В целом, с увеличением числа каналов вероятность отказа снижается медленнее, чем для марковской СМО с аналогичными (среднее число заявок в единицу времени и пропускная способность одного канала) параметрами. Также можно отметить, что увеличение числа мест в очереди влияет на пропускную способность рассмотренной нами СМО сильнее, чем в аналогичной марковской.

Заключение

В ходе работы была построена имитационная модель работы транспортных терминалов, основанная на совместном использовании аппарата теории немарковских случайных процессов и технологического анализа работы грузовых терминалов. Построенная модель позволяет идентифицировать, а также каче-

ственно и количественно оценить показатели процесса переработки грузов с учетом влияния случайных факторов. На основе модели создан программный модуль, с помощью которых можно проводить многовариантных сценарных расчетов. Результаты массового вычислительного эксперимента позволяют оценить и высказать рекомендации по организации и планированию работы транспортных терминалов.

Построенная модель и программная система могут быть применены исследования любых грузовых терминалов с аналогичной технологией и структурой. В дальнейшем предполагается развитие данного подхода, в частности, построение и исследование модели, в которой каналы являются специализированными (по типам заявок), а выходной поток не является простейшим.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, коды проектов 12-07-13116, 12-07-33045, 11-07-00245.

Библиографический список

1. Хинчин А.Я. Работы по математической теории массового обслуживания. СПб.: Либроком, 2010. 240 с.
2. Ивницкий В.А. Теория сетей массового обслуживания. СПб.: Физико-математическая литература, 2004. 772 с.
3. Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. СПб.: Либроком, 2010. 520 с.
4. Федеральное дорожное агентство [Электронный ресурс]. Дата обновления: 30.04.2013. URL: http://rosavtodor.ru/information/Osnovnye_dokumenty/Gosudarsvennaya_programma_Rossijskoj_Federacii_Razvitie_transportnoj_sistemy.html (дата обращения: 30.04.2013).
5. Емельянов А.А., Власова Е.А., Дума Р.В. Имитационное моделирование экономических процессов. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.
6. Козлов П.А., Козлова В.П. Оптимизация функциональной структуры транспортного узла // Наука и техника транспорта. 2005. № 1. С. 17–31.
7. Межотраслевые нормы времени на погрузку, разгрузку вагонов, автотранспорта и складские работы: указание Минтруда РФ № 76 от 17.10.2000 г. // Министерство труда и социального развития РФ. URL: <http://www.mintrans.ru>
8. Правдин Н.В., Дыканюк М.Л., Негрей В.Я. Прогнозирование грузовых потоков. М.: Транспорт, 1987. 247 с.
9. Казаков А.Л., Маслов А.М. Применение имитационного моделирования для синтетического планирования грузовых терминалов железнодорожного транспорта // Вестник ИрГТУ. 2010. № 6 (46). С. 146–153.