

УДК 656.025.6

Вихарев Сергей Викторович,

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Институт математики и компьютерных наук,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»
г.Екатеринбург, Российская Федерация

Синицын Евгений Валентинович,

доктор физико-математических наук,
заведующий кафедрой
Анализа систем и принятия решений,
Высшая школа экономики и менеджмента,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»
г.Екатеринбург, Российская Федерация

Брусянин Дмитрий Алексеевич,

кандидат технических наук,
начальник научно-исследовательской части УрГУПС,
г.Екатеринбург, Российская Федерация

Низовцева Ирина Геннадьевна,

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Йенский Университет имени Фридриха Шиллера,
Йена, Федеративная Республика Германия

Миронов Данил Александрович,

студент,
Институт математики и компьютерных наук,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»
г.Екатеринбург, Российская Федерация

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОСТУПНОСТИ
КАЧЕСТВЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ УСЛУГ
НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОЙ СЕРИИ СИСТЕМ
МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕТЯХ
С РАЗДЕЛЕННЫМИ ИНТЕРЕСАМИ**

Аннотация:

Настоящее исследование посвящено изучению взаимоотношений регуляторов, исполнителей и потребителей в системах с разделенными интересами. В качестве естественного примера системы с разделенными интересами в настоящей работе используется транспортная инфраструктура. Цель построить модель взаимодействия исполнителей и потребителей и разработать подход к использованию расчетов, полученных на модели взаимодействия регуляторов и исполнителей, в качестве исходных данных для новой модели. В результате получена имитационная модель на основе дискретной серии систем массового обслуживания, которая позволяет получить распределение пассажиров по каналам обслуживания с учетом их качества на пять отчетных периодов вперед.

Ключевые слова:

системы с разделенными интересами, транспортная инфраструктура, регулирование, качество каналов обслуживания

Настоящая работа посвящена изучению взаимоотношений регуляторов, исполнителей и потребителей в системах с разделенными интересами.

Для того, чтобы сформулировать понятие системы с разделенными интересами [1], нам потребуются ввести некоторые обозначения.

Множество регуляторов обозначим A (от англ. - authorities), множество исполнителей — E (от англ. – executers), множество потребителей – (от англ. – customer).

2^X - множество всех подмножеств произвольного множества X (булеан X). Множество действительных чисел традиционно обозначим R

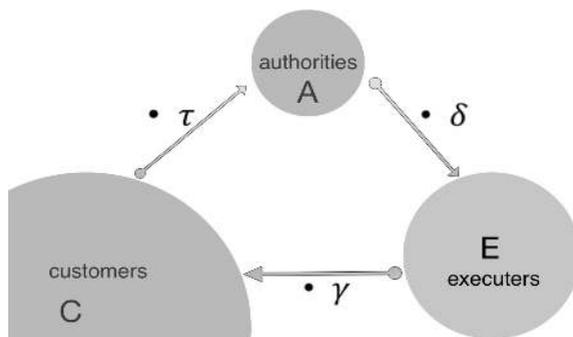


Рис. 1. Система с разделенными интересами.

Система с разделенными интересами это совокупность $(A, E, C, \alpha, \gamma, \tau)$, где $\delta: A \times 2^E \rightarrow R$, $\gamma: E \times 2^C \rightarrow R$, $\tau: A \times 2^C \rightarrow R$ - функции взаимодействия.

Естественным примером систем с разделенными интересами является система транспортного обслуживания населения, где A – множество государственных и муниципальных органов власти регулирующих оказания транспортных услуг и выделяющих субсидии на их оказание, E – множество транспортных компаний, C – множество пассажиров.

В работе ставится задача определения функций взаимодействия γ [2]. На основе предложенной в [3] модели взаимодействия δ между множеством регуляторов и множеством исполнителей разработать модель взаимодействия γ между множеством исполнителей и множеством потребителей. Интерес представляет, как построение самой модели γ , так и подход к использованию расчетов, полученных на модели δ , в качестве исходных данных для модели взаимодействия γ .

Исследования последних лет посвящены оценкам качества транспортной услуги, нормативам, которые вводит регулятор по отношению к перевозчикам, переключению пассажиров с общественного транспорта на наземный [4].

В статье [5] представлен метод для симуляции нестационарного, не экспоненциального и зависящего от предыдущих поступлений входящего потока заявок в систему. Основной целью работы было исследование как в условиях таких потоков изменятся числовые характеристики показателей эффективности системы массового обслуживания. В работе было выделено 3 параметра, изменяя которые достигались существенные различия с простым пуассоновским потоком заявок.

В работе [6] исследовалось влияние не пуассоновских входящих потоков в системах массового обслуживания, представляющую собой больницу, в которую попадают пациенты. Основой показатель эффективности работы системы был процент отказов пациентов, то есть нехватку мест для размещения очередного пациента в больнице и его переход в другую больницу. В статье упомянуто, что имеет смысл рассматривать поступление пациентов группами, к примеру, из-за расписания общественного транспорта, который идет в больницу. Так же на неравномерность поступления пациентов влияет общая схема записи в больницу.

Зависимость количества поступающих заявок от времени была рассмотрена в предположении, что поток поступления одинаков для каждого часа, в течении одного дня, но может изменяться в течении недели.

Связь очереди пациентов предыдущего и текущего дня не рассматривалась. Так же в работе количество каналов обслуживания (мест для размещения пациентов) было фиксированное на все время работы системы.

В результате было показано, что вероятность отказа обслуживания возрастает, когда есть зависимость во входящем потоке заявок в СМО и поставлена дальнейшая задача получить более точную аппроксимацию этой зависимости.

Для нашей модели принципиально учитывать «перенос» пассажиров, необслуженных в предыдущем часе на следующий для обеспечения реалистичности модели. Так же мы можем увеличивать или уменьшать количество обслуживающих каналов (автобусов) в каждом промежутке времени.

В моделировании взаимодействия исполнитель-потребитель существенную роль играет оценка качества предоставляемой услуги. Изучение самого критерия оценки качества не является целью данной работы. Построение методологии и оценка удовлетворенности граждан общественным транспортом описаны в работах [7, 8, 9]. В работе [7] рассматривается проблема различия понимания термина качество для каждого участника системы с разделенными интересами. Авторы оценивают производительность регионального железнодорожного транспорта в сравнении с остальными видами общественного транспорта. Так же их целью является построение модели, которая может непрерывно оценивать качество и производительность общественного транспорта.

Без постоянного контроля уровня качество и его поддержания пассажиры могут начать переключаться на другие виды транспорта.

Так в статье [8] приводится описание ситуации, в которой общественный городской транспорт не адаптировался к нуждам потребителей, не увеличивал качество предоставляемых услуг. Из-за этого новый игрок на рынке, который предоставлял более качественные и дешевые услуги, был более гибкий за короткий срок смог переключить серьезную часть пассажиропотока на себя. Еще в июне 2015 услугами этого нового игрока пользовалось 5 миллионов пассажиров, к октябрю того же года эта цифра уже составила 16 миллионов человек. Все респонденты назвали основными критериями отказа от стандартных видов транспорта таких как метро и автобусы - доступность по времени и низкую стоимость поездки. Однако с увеличением количества автомобилей на улицах города средняя скорость движения в центре снизилась на 12 процентов за последние 5 лет. Для корректировки ситуации городским властям необходимо модифицировать схему общественного

транспорта в соответствии с нуждами горожан, так же увеличить качество перевозок, снизить цену на услуги.

Математическая формализация

Для описания взаимодействия регулятора и перевозчиков взята известная популяционная модель Лотки-Вольтерры, которая вполне укладывается в интуитивное представление о том, как реагируют экономические показатели перевозчика на введение новых правил и требований регулятора. [3]. Коэффициенты модели были интерпретированы для описания взаимодействия регулятора и хозяйствующих субъектов в транспортной отрасли.

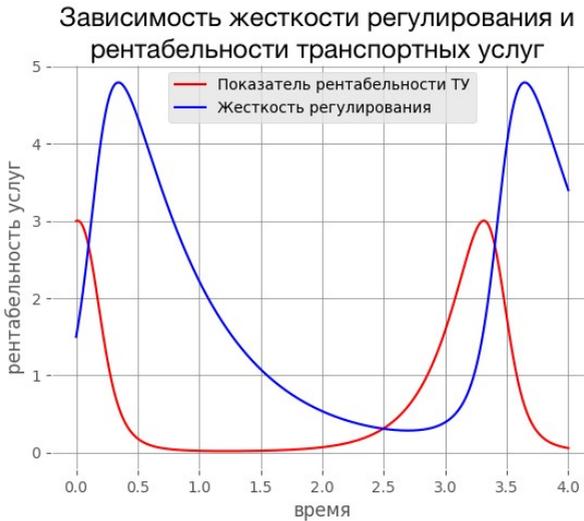


Рис. 2. Зависимость жесткости регулирования и рентабельности транспортных услуг

Регулятор вводит новые требования, это значит, что с точки зрения перевозчика жесткость регулирования возросла, но он какое-то время еще продолжает сохранять рентабельность. Это можно объяснить тем, что, как правило, новые требования вводятся несколько отложено, а также тем, что перевозчик использует накопленные ресурсы (например, имеющийся подвижной состав, складские запасы) для того, чтобы как можно дольше сохранять рентабельность своих услуг.

Дальше он вынужден применять новые требования по мере их непосредственного вступления в силу, либо с началом проверок.

Естественно, что рентабельность у перевозчика начинает падать, но в то же самое время он начинает адаптироваться к новым требованиям, закладывая новые расходы в тариф. Таким образом со временем, несмотря на то, что сами правила не изменились с точки зрения перевозчика жесткость регулирования ослабевает.

В качестве основы для изучения взаимодействия перевозчика и пассажира мы можем взять показатели качества транспортной услуги Q (от. англ. *quality*), зависящие от ожидаемых рентабельности P (от. англ. *profitability*) и жесткости регулирования R (от. англ. *regulation*) на несколько отчетных периодов вперед. Положим показатели Q, P, R принимающими значения на отрезке $[0, 10]$. Примером зависимости качества от рентабельности и регулирования может быть следующая формула:

$$Q = R \left(1 - \frac{1}{1 + P} \right)$$

Рассмотрим взаимодействие между поставщиками транспортных услуг и конечными потребителями (пассажирами и грузоотправителями). Оно основано на удовлетворении потребности в перевозке. Компании-перевозчики предлагают потребителям ограниченное количество транспортных средств, выполняющих рейсы по некоторому расписанию. Каждый маршрут и в том числе рейс может быть оценен с точки зрения его привлекательности для пассажира — совокупного качества предоставляемой услуги [10]. Ясно, что перевозчики обязаны оказывать транспортные услуги, соответствующие требованиям, предъявляемым к ним нормативной базой. Тем не менее совокупное качество может отличаться не только от перевозчика к перевозчику, но и от рейса к рейсу, поскольку может использоваться различный подвижной состав, может отличаться время в пути, экологичность и пр. Поэтому целью взаимодействия перевозчиков и пассажиров является не просто удовлетворение спроса на транспортные услуги, а выполнение этой работы так и таким подвижным составом, чтобы уровень качества не опускался ниже некоторого, приемлемого для пассажира уровня.

В качестве характеристик эффективности обслуживания могут применяться различные величины и функции, традиционные для систем массового обслуживания (СМО).

1. Среднее количество заявок, которое может обслужить СМО в единицу времени.
2. Средний процент заявок, получающих отказ и покидающих СМО необслуженными.

3. Вероятность того, что поступившая заявка будет немедленно принята к обслуживанию.
4. Среднее время ожидания в очереди.
5. Закон распределения времени ожидания.
6. Среднее количество заявок, находящихся в очереди.
7. Закон распределения количества заявок в очереди.

Качество совокупного обслуживания для конкретного канала складывается из качества подвижного состава, близости пункта обслуживания к потребителю, времени ожидания посадки в транспортное средство, времени, затраченного на обслуживания клиента.

Перечислим требования, предъявляемые к имитационной модели перевозчик-пассажир.

- 1) Необходимо обеспечить учет неоднородности обращения пассажиров за транспортной услугой в течении одного дня.
- 2) Обеспечить передачу данных необслуженных пассажиров из одного временного полуинтервала в последующий.
- 3) Обеспечить реалистичность тестовых данных, в том числе наличие временных полуинтервалов пиковых нагрузок, с низкой наполняемостью транспортных средств.
- 4) Обеспечить возможность добавления и удаления в имитационную модель каналов обслуживания и временных промежутков простоя и не функционирования системы.

Получаем, что для моделирования системы взаимодействия перевозчиков и пассажиров недостаточно одной СМО с отказами так как необходимо гибко менять количество каналов обслуживания и размер очереди ожидания. Так же нужно учитывать, что скорость обслуживания и поступления заявок могут меняться в зависимости от конкретного промежутка времени. Такими промежутками времени могут являться часы пик в работе транспортной сети. Для модели это означает, что входящий поток заявок в систему не является пуассоновским.

Для каждого часа в течении суток зададим свою систему массового обслуживания. Объединение таких систем массового обслуживания назовем дискретной серией.

На вход каждой из этих систем будем подавать начальную интенсивность входящего потока, интенсивность обслуживания, количество обслуживающих маршрутов и размер очереди ожидания пассажиров на остановке.

Дискретная серия систем массового обслуживания

Под заданные требования и входные параметры для описания одного часа взаимодействия перевозчик-пассажир подходит система массового обслуживания с отказами. Считаем, что если пассажир подошел к остановке и на ней слишком много других людей, то пассажир отказывается от услуги и может переключиться на другой вид транспорта. Таким образом мы вводим размер очереди (q) для СМО. Если пассажиру хватило места на остановке, то он встает в очередь и ждет обслуживания. В нашем случае каналы (α) – это транспортные средства перевозчиков. Количество каналов (n) характеризует доступность точек приема и отправки пассажиров (грузов).

Для каждого часа введем интенсивность поступления пассажиров $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_{24}$. Скорость обслуживания на всех промежутках положим μ . На каждом соединении двух систем массового обслуживания будем осуществлять перенос пассажиров, которые уже стояли в очереди с учетом времени, которое уже было ими затрачено. То есть начальное время ожидания в очереди текущего часа (Q_n) для заявки, которая уже находилась в системе предыдущего часа (Q_{n-1}) равно $t_{n_0} = t_{n-1}$, где t_{n-1} - это количество времени, которое прошло с момента прихода заявки в Q_n . Для всех новых заявок $t_{n_0} = 0$

Из экспериментальных данных мы можем выделить часы пик для каждого дня и давать на вход системе массового обслуживания соответствующие данные, включая увеличенное количество каналов обслуживания для симуляции пиковых нагрузок входящего потока пассажиров.

Разобьем множество всех каналов на непересекающиеся подмножества по уровню их качественности. Считаем, что каждый потребитель всегда выбирает самый качественный канал из доступных. При этом существует порог качества канала, обозначим его x_0 ниже которого потребитель перестает пользоваться транспортной услугой, то есть отказывается от обслуживания.

В каждой системе будем задавать 2 линии отсечения. Первая будет отделять качественные каналы от некачественных. При переходе через вторую линию пассажир перестает пользоваться услугами перевозчика и покидает систему. Тогда одним из важных показателей эффективности системы будет количество пассажиров, которые переключились на альтернативные виды транспорта из-за плохого качества услуги.

Рассмотрим пример с распределением качественных каналов в отдельно взятой СМО.

Пусть в нашей системе есть набор каналов с заданными характеристиками. Построим по ним гистограмму. По оси X будем откладывать уровень качества группы каналов. По оси Y – количество каналов, которые попадают в заданный интервал. Так же построим линию отсечения, которая показывает, какие каналы потребители будут использовать в первую очередь.

Считаем, что хорошие каналы лежат левее уровня качества X_0 . При падении уровня качества правее уровня X_1 пассажир отказывается от услуги и переходит на использование другого вида транспорта.

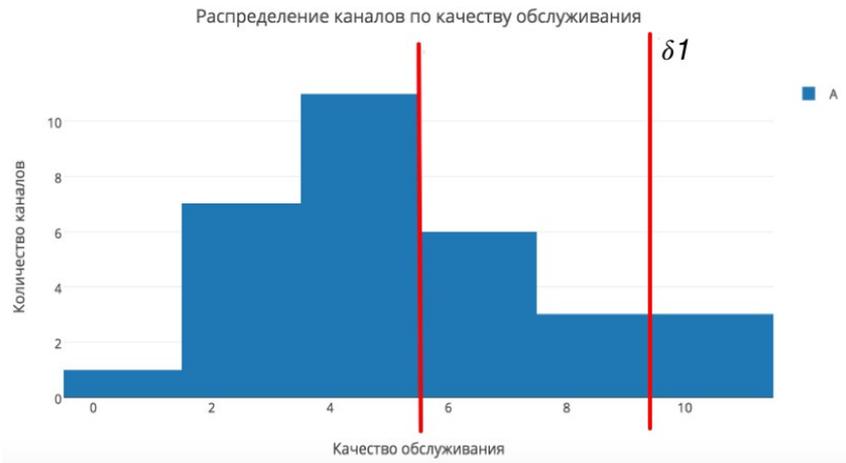


Рис. 3. Линии качества

Если пассажир попадет на каналы, которые находятся левее линии отсечения δ_0 , то он останется удовлетворённым перевозкой.

Если он попадет на канал из центральной группы между линиями δ_0 и δ_1 , пассажир будет не удовлетворен качеством предоставленной транспортной услуги, но воспользуется ей вновь.

При попадании на канал правее линии δ_1 пассажир переключится на другой вид транспорта.

Пример работы дискретной серии систем массового обслуживания

Изменения воздействия регуляторов (см. рис. 1.) будут сказываться на количестве каналов для обслуживания и расположении линий отсечений по качеству. Из расчета качества в зависимости от жесткости регулирования и рентабельности, положим, что линия отсечения

X_0 будет находится на уровне качества $\frac{2}{3} Q$, линия X_1 - на уровне качества Q , где Q – качество.

Рассмотрим дискретную серию для 8 часов работы транспортной сети на примере показателей жесткости регулирования и рентабельности транспортных услуг для одного отчетного периода. Каждая система в серии работает на протяжении 60 минут. Зададим характеристики одной СМО. Интенсивность входного потока в зависимости от времени зададим функцией $4 + 5 * \sin\left(\frac{\pi * t}{480}\right)^2$. При этом выделим четвертый час как час пик и увеличим на нем интенсивность входящего потока $8 + 5 * \sin\left(\frac{\pi * t}{480}\right)^2$. Интенсивность обслуживания положим равной 2, т.е. $\frac{1}{2}$ заявок в минуту. Количество каналов обслуживания и размер очереди оставим такими же как в случае с одной СМО.

Получаем следующие показатели работы системы.

- 73 процента пассажиров попали на некачественные каналы.
- 58 процентов пассажиров отказались от транспортной услуги, т.е. переключились на другой вид транспорта.
- Средняя длина очереди равна 0.627 пассажира.
- 68 пассажиров не попали в систему по причине полной занятости очереди и всех каналов обслуживания.
- Среднее время обслуживания одного пассажира составило 0.48 минуты.
- Среднее время ожидания пассажира составило 0.04 минуты.

Приведем результаты работы системы на графиках.

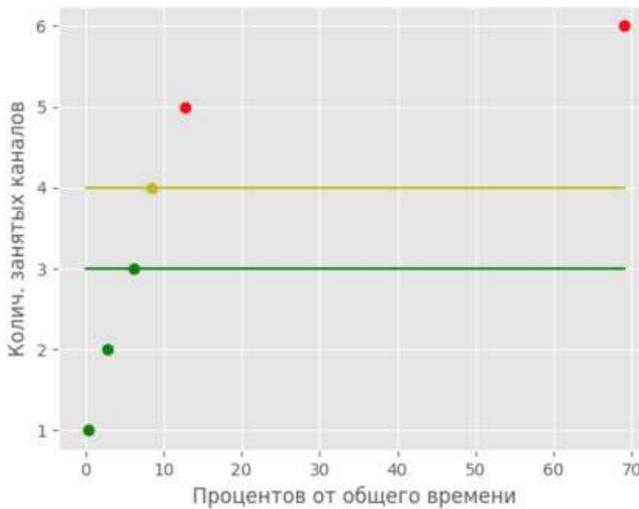
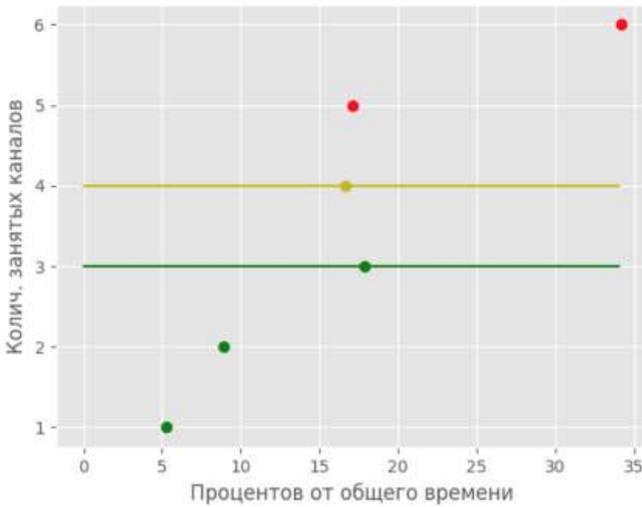


Рис. 4. Число занятых каналов от общего времени работы системы с разбиением по качеству. Нумерация слева – направо. (А) – Обычный час в дискретной серии. (Б) – Час пик в дискретной серии

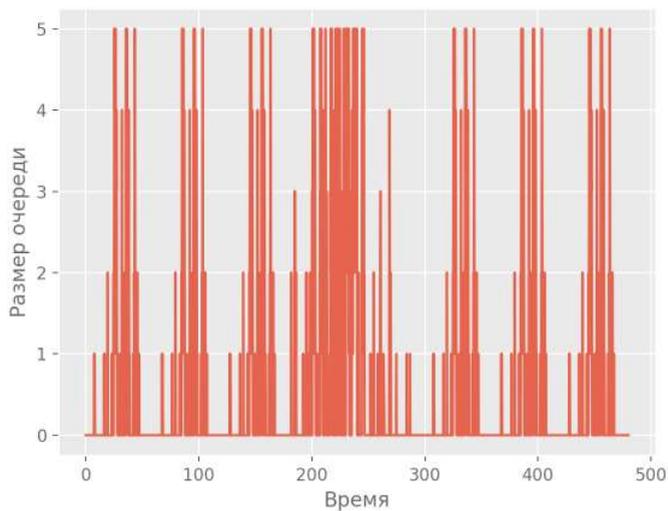


Рис. 5. Зависимость размера очереди от времени

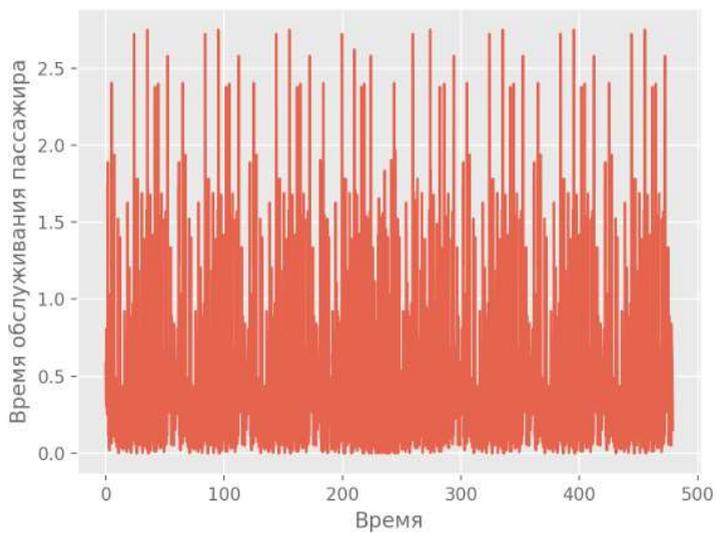


Рис. 6. Зависимость времени обслуживания пассажира в зависимости от времени

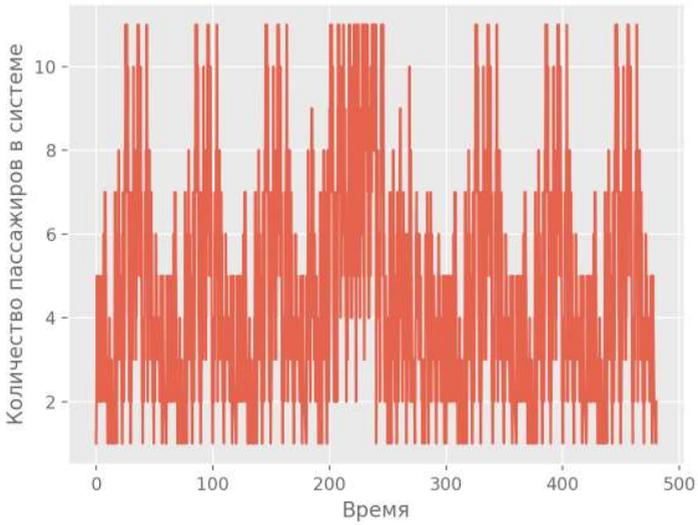


Рис. 7. Зависимость количества пассажиров в системе в зависимости от времени

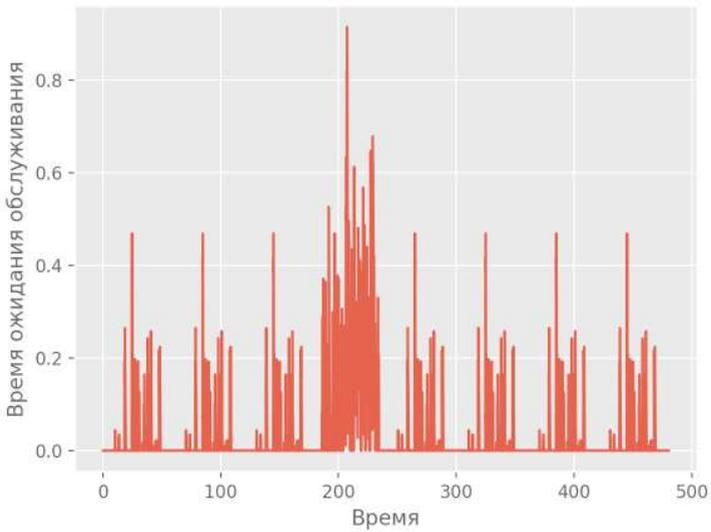


Рис. 8. Зависимость времени ожидания пассажиров в системе в зависимости от времени

Сравним число занятых каналов на протяжении пяти отчетных периодов.

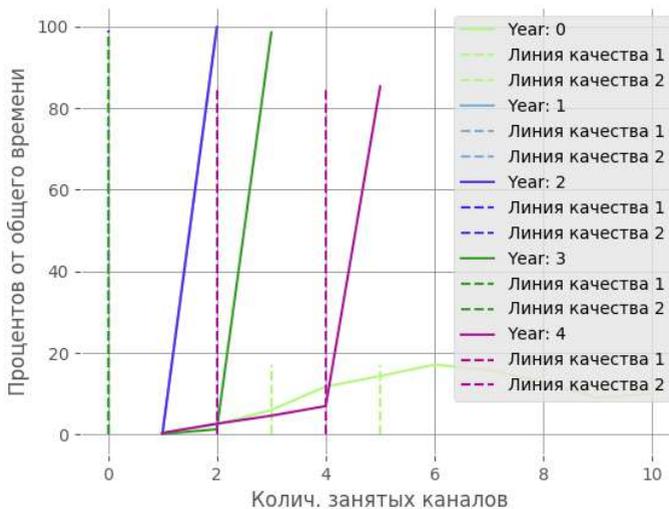
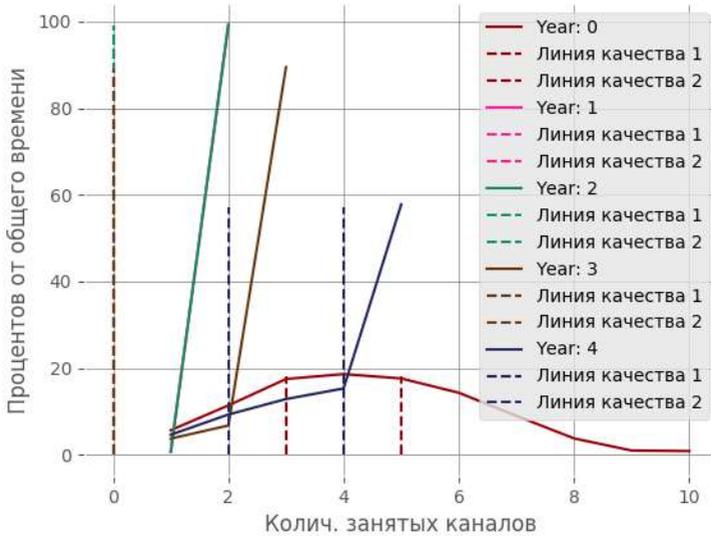


Рис. 9. Число занятых каналов от общего времени работы системы с разбиением по качеству. Нумерация слева – направо. (А) – Обычный час в дискретной серии. (Б) – Час пик в дискретной серии

Построение такой имитационной модели представляется хорошей аппроксимацией процессов по перевозке пассажиров, которые возникают в реальном мире. У нас есть множество параметров для тонкой настройки каждой системы массового обслуживания, представляющей один час, а также достаточно короткие интервалы для изменения этих параметров на протяжении суток. Так же мы можем моделировать работу системы в нестационарном режиме. На каждом часе мы можем добавлять или убавлять количество каналов обслуживания, изменять размер очереди, задавать новое распределение по качественным каналам. Сложность реализации такого решения не будет превышать сложности аналитического решения, однако вывод последнего с такими условиями затруднен и неочевиден.

Список используемых источников

1. Сизый С. В., Щичко А. В., Вихарев С. В. Организационные процессы в сетях с разделенными интересами: актуальность, постановка задачи, план исследования (статья) Печ. //Вестник УрГУПС. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – № 1-2. – С. 34-42
2. Вихарев С.В., Сизый С. В., Сай В.М., Варанкина К.А. Организация содержания транспортной инфраструктуры в сетях с разделенными интересами с применением математической теории автоматов (статья) Печ. Вестник УрГУПС. Екатеринбург : УрГУПС, 2011. № 3(11). С. 42–54. ISSN 2079-0392.
3. S. Vikharev, D Mironov, D. Brusyanin, I. Nizovtseva. Modelling quality switching on public transport by discrete series of queuing systems in shared interests network // The 9th International Conference Transport Problems 28—30 June 2017, Katowice, Poland. Conference proceedings, p. 87-93.
4. Emma G. Fitzsimmons. Downside of ride-hailing. More gridlock. // The New York times march 8, 2017
5. Nelson, B. and Gerhardt, I. Modelling and simulating non-stationary arrival processes to facilitate analysis // 2011
6. Christian Rohrbeck. The Impact of non-Poisson Arrival Processes in Health Care Facilities with Finite Capacity.
7. Ivana Olivkova. Evaluation of public transport criteria in terms of passengers' satisfaction. // 2016
8. Ismail R., Hafezi M.H., Nor R.M., Ambak K. // Passengers preference and satisfaction of public transport in Malaysia 2012
9. Zitrický, V. Gasparik, Jozef Pečený, L. // The methodology of rating quality standards in the regional passenger transport

10. D. Brusyanin, M. Zhuravskaya S. Vikharev, E. Sinitsyn. The mathematical model of public transport network index // The 8th International Conference Transport Problems 27 June — 1 July 2016, Katowice, Poland. Conference proceedings, p. 70-75

Vikharev Sergey,

Candidate of Physico-mathematical Sciences,
Senior researcher,
Institute of Natural Sciences and Mathematics,
Ural Federal University
named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
Ekaterinburg, Russian Federation

Sinitsyn Evgeny,

Doctor of Physico-mathematical Sciences,
Head of the Financial Management Department,
Graduate School of Economics and Management,
Ural Federal University
named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
Ekaterinburg, Russian Federation

Brusyanin Dmitry,

Candidate of Technical Sciences,
Head of the Scientific Department,
Ural State University of Railway Transport
Ekaterinburg, Russian Federation

Nizovtseva Irina,

Candidate of Physico-mathematical Sciences,
Senior researcher,
Friedrich Schiller-University Jena
Jena, Federal Republic of Germany

Mironov Danil,

Student,
Institute of Natural Sciences and Mathematics,
Ural Federal University
named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
Ekaterinburg, Russian Federation

**MODELING ACCESSIBILITY OF QUALITY
TRANSPORT SERVICES ON THE BASIS OF**

DISCRETE SERIES OF QUEUEING NETWORKS IN SHARED INTERESTS SYSTEMS

Abstract:

This study is devoted to the study of the relationship between regulators, executors and consumers in shared interest's systems. As a natural example of a system with shared interests, this paper uses the transport infrastructure. The goal is to build a model of interaction between executors and consumers and develop an approach to using the calculations obtained on the model of interaction between regulators and executors, as the initial data for the new model. As a result, a simulation model based on a discrete series of queuing systems has been obtained, which allows to obtain the distribution of passengers along the service channels, taking into account their quality for five reporting periods in advance.

Key words:

shared interest system, transport infrastructure, regulation, quality of service channels