

ПОСТРОЕНИЕ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ МАРШРУТНЫХ АВТОБУСОВ

© 2018

М.В. Крайцова, аспирант

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва (Россия)

Ключевые слова: имитационная модель; система массового обслуживания; рейс маршрутного автобуса; транспортная система; пассажиропоток.

Аннотация: В статье рассмотрена и реализована система массового обслуживания на примере конкретной управленческой задачи системы рейса маршрутного автобуса. Данная система играет важную роль в области экономики и быта, где, с одной стороны, возникают массовые требования на выполнение определенных услуг, а с другой стороны, происходит удовлетворение этих запросов. Выделены принципы эффективности работы системы, которые влияют на оптимизацию работы автобусного потока. Определены основные элементы, и разработан алгоритм работы системы с формированием входных и выходных данных. Построена экономико-математическая модель, в которой при помощи специально разработанного программного кода и с использованием возможностей инструментов C++ происходит имитация, в частности, удовлетворения требований пассажиров, поступающих в данную систему. Характерные особенности учитываются в компьютерной программе, что делает имитационную модель действенным инструментом принятия решений в условиях неопределенности. Помимо описания модели, по итогу ее использования приведены результаты расчетов в графическом и табличном видах для наглядного изображения вариантов исходов ситуации. Модель, имитирующая посадку и высадку пассажиров, приспособлена для сбора статистики очереди и нахождения распределения случайной переменной. По результатам исследования получено решение задачи по имитированию событий на автобусной остановке. Данная модель дает возможность планировать события на автобусной остановке с целью достичь равномерности нагрузки и динамичности маршрута, выявить проблемы пропускной способности, которые негативно влияют на работу транспортного цикла.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортный бизнес – довольно выгодное вложение для собственного капитала. Грузо- и пассажироперевозки востребованы всегда потому, что спрос потребителей на доступность перемещения из пункта А в пункт В растет, вследствие чего растет и предложение. Разработка имитационной модели класса систем массового обслуживания (далее – СМО) актуальна для компаний, осуществляющих управление городским автотранспортом [1]. В статье предлагается модель рейса маршрутного автобуса. Под рейсом мы понимаем движение автобуса по маршруту в одном направлении от одного конечного пункта до другого [2; 3]. Автобусный транспорт представляется как самый массовый вид пассажирского автомобильного транспорта, играя существенную роль в единой транспортной системе страны [4]. Мы изучаем одну из задач транспортной системы – оптимизацию посадки и высадки пассажиров.

Так, на сегодняшний день задачи изучения управляемых СМО являются важными для транспортного бизнеса потому, что эффективность работы и функционирование многих технических систем достигается с их помощью, что позволяет удерживаться на данном сегменте рынка при жесткой конкуренции. Актуальность моделирования системы рейсов маршрутных автобусов высока, ввиду неотъемлемой части системы в общественной жизнедеятельности. Согласно статистическим данным Росстата, на автобусные перевозки приходится более 60 % объема перевозок от всех видов массового пассажирского транспорта, где пассажирооборот составляет около 40 % [5]. Заметим, что класс СМО с управлением по времени ожидания пока остается малоизученным, хотя именно такие системы являются наилучшими моделями многих реальных объектов,

в частности вычислительных систем, используемых для обработки поступающей на поток информации, а также систем связи. Причиной проведения исследования также послужили работы по исследованию влияния стратегий проведения контроля на транспортные услуги и показавших необходимость в разработке стратегий повышения надежности обслуживания для снижения ненадежности услуг, где одной из распространенных практик является разработка имитационной модели СМО [6; 7].

Как правило, при построении имитационной модели описываются законы функционирования каждого элемента объекта и связи между ними. А работа с имитационной моделью заключается в проведении имитационного эксперимента. Процесс, протекающий в модели в ходе эксперимента, подобен процессу в реальном объекте, поэтому исследование объекта на его имитационной модели сводится к изучению характеристик процесса, протекающего в ходе эксперимента.

Цель исследования – реализация системы массового обслуживания на примере рейса маршрутного автобуса. Объектом исследования является система «рейс маршрутного автобуса», а предметом – деятельность в сфере массового обслуживания.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

По расписанию автобус должен приходить на остановку каждые 30 мин., однако возможно его опоздание на $1,5 \pm 1,5$ мин. Опоздание автобуса никак не зависит от опоздания предыдущего автобуса и не влияет на опоздание следующего. Приход людей на автобусную остановку подчиняется закону Пуассона с интенсивностью 12 человек каждые 30 мин. Автобус вместимостью 50 человек в момент своего прибытия везет 35 ± 15 человек.

После того, как от 3 до 7 пассажиров выйдут (распределение равномерное), в автобус входят столько ожидающих, сколько возможно. Те, кто не смог сесть после того, как автобус заполнился, уходят и больше не возвращаются. Для высадки пассажира требуется 4 ± 3 сек., а для посадки – 3 ± 8 сек. Пассажиры выходят и входят один за другим. Ожидающие не начинают посадки до тех пор, пока из автобуса не выйдут все желающие. Посадка производится в соответствии с правилом «первым пришел – первым обслужен». Все пришедшие на остановку за время посадки имеют право войти при условии, что для них есть место. В случае временного узла между событиями «автобус закончил посадку» и «прибыл еще один пассажир» прибывший пассажир садится в автобус (при условии, конечно, что для него есть место).

В проекте автор решал задачу исследования: построить модель, имитирующую события на автобусной остановке, а также приспособить разработанную модель для получения следующей информации:

- 1) собрать статистику очереди, в которой находятся люди, ожидающие автобуса, включая распределение времени ожидания в очереди;
- 2) найти распределение случайной переменной «число необслуженных пассажиров на один прибывающий автобус».

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

По примеру исследователей П.А. Андерссона и И.В. Степанченко, моделирующих маршруты городского транспорта [8; 9], автором была разработана и описана имитационная модель рейса маршрутного автобуса. На рис. 1 схематично представлен алгоритм транспортной системы.

Основными элементами СМО являются:

- 1) входной поток заявок, представленный пассажирами на посадку;
- 2) очередь, которая формируется из пассажиров;
- 3) каналы связи с фактом «посадка»;
- 4) выходной поток, по результату которого имеются обслуженные и необслуженные пассажиры.

СМО в экономике содержит следующие принципы эффективности работы модели:

- среднее число заявок, обслуживаемое в единицу времени;

- вероятность обслуживания поступившей заявки;
- вероятность отказа поступившей заявки;
- среднее время пребывания заявки.

С учетом данных характеристик владелец транспортной компании извлекает важные элементы для оптимизации работы автобусного потока, где результат в конечном счете будет выражаться в рентабельности, доходе и издержках фирмы. Другими словами, параметры, такие как число каналов, интенсивность потока заявок, распределение времени обслуживания, позволяющая работать в условиях осведомленности транспортной системы. Моделируя ситуацию, мы можем изменить управление или выявить проблемы пропускной способности, которые негативно влияют на работу транспортного цикла.

Перевозки пассажиров должны быть смоделированы с точки зрения реальности, что позволит точно оценить складывающуюся ситуацию. Для наглядного представления описываемого алгоритма на рис. 2 показана блок-схема работы системы, которая была построена исходя из условия постановки задачи.

Рассмотрим моделирование программы, начиная с формирования данных.

Входные данные:

- прибывающие на остановку пассажиры;
- пассажиры, выходящие из автобуса;
- частота прихода автобуса на остановку;
- количество прогонов для определения доверительного интервала;
- погрешность для определения необходимого числа экспериментов.

Выходные данные:

- время пребывания в очереди;
- число необслуженных пассажиров на один прибывающий автобус;
- оценка 90%-го доверительного интервала для показателя среднего числа заданий в процессоре при заданном количестве прогонов по формуле [10]:

$$\bar{X}(n) \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{S^2(n)/n}$$

где \bar{X} – среднее значение по совокупности;

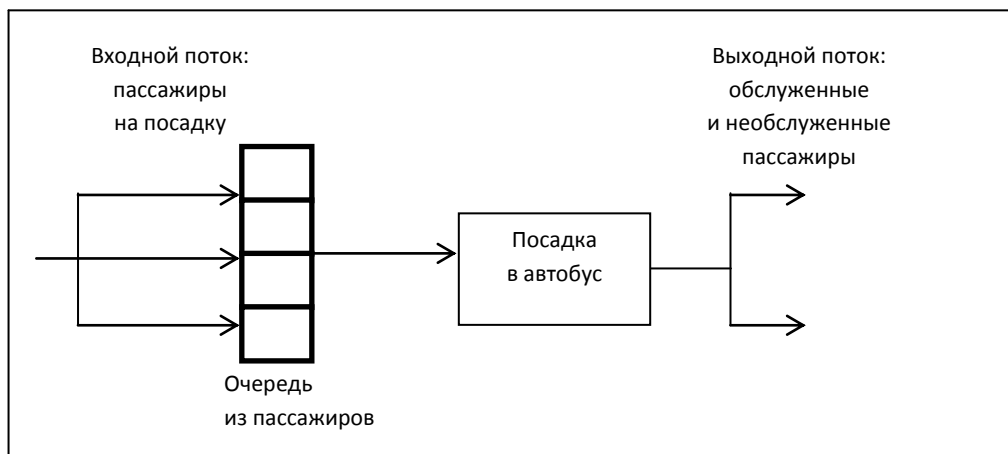


Рис. 1. Алгоритм работы системы

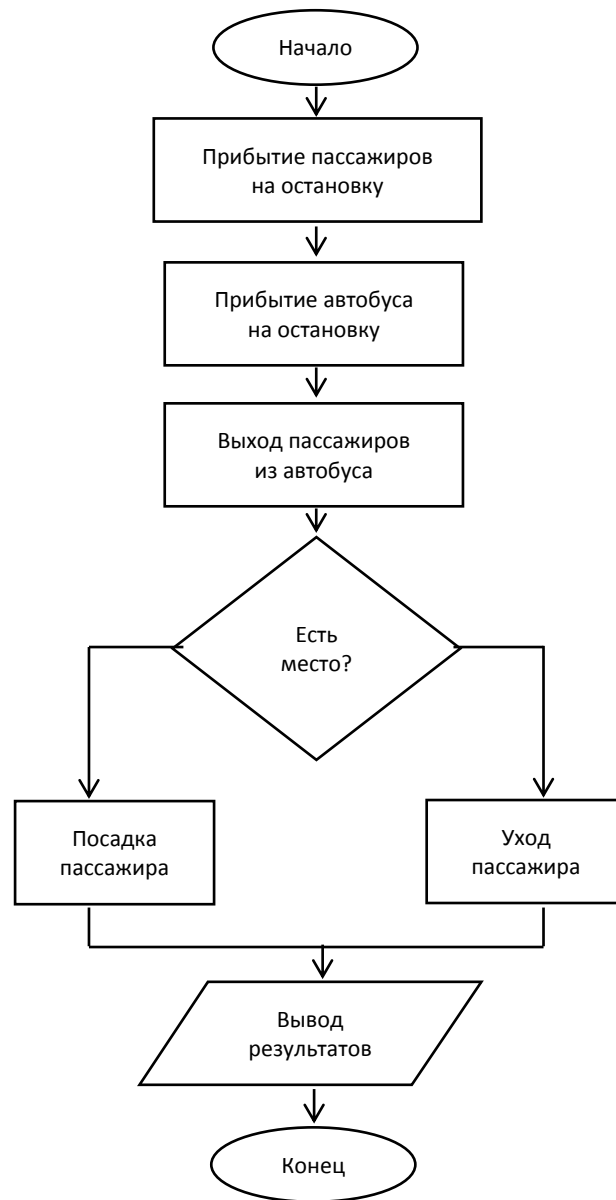


Рис. 2. Блок-схема работы системы

n – число испытаний;

α – степень надежности;

S^2 – дисперсия;

z – значение критерия по таблице Стьюдента для заданного α [11; 12];

– необходимое число прогонов для заданной абсолютной погрешности по формуле [13]:

$$n_a^* = \min \left\{ I \geq n : t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{S^2(n)/n} \leq \beta \right\}.$$

Знак «:» означает «при условии что», т. е. при увеличении i оценивается величина n [14]. Обратим внимание, что, опираясь на результаты зарубежных исследователей Ф. Чжао, М. Пол и Д.Х. Ли, которые показали, что время пребывания на автобусной остановке является одним из основных компонентов транспортной системы [15–17], в модели учитывающееся время прибытия автобуса на остановку осно-

вывается на реальных показателях при моделировании процессов посадки и высадки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Автором был написан программный код на C++, реализующий моделирование рейса маршрутного автобуса, что позволяет владельцу минимизировать затраты на программный продукт, в отличие от систем типа ARENA или AnyLogic. Результаты работы программы, согласно исходным данным, показаны на рис. 3 и 4.

Полученная модель является значимой, так как по критерию Стьюдента [18] значение находится в границах его критического значения и составляет 1,7. Определено, что среднее время ожидания в очереди составляет 17,8 мин., при этом при заданном числе пассажиров в 20 человек количество необслуженных составляет 5 человек. Стандартное отклонение свидетельствует о том, что построенная модель способна объяснить больше, чем 30 % данных.

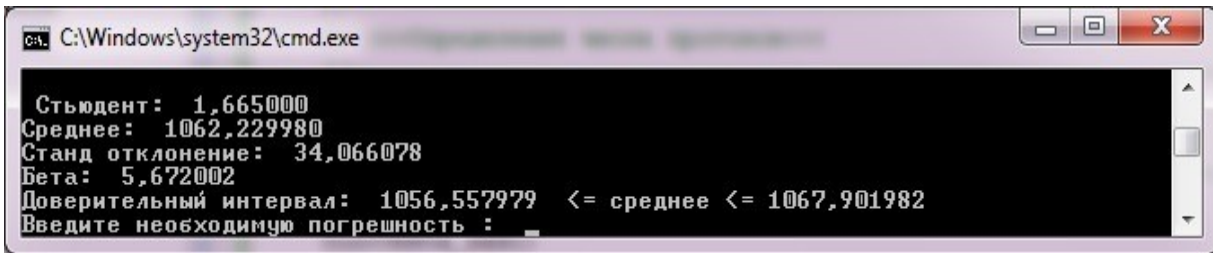


Рис. 3. Графическое представление результатов при N=100

№ эксперимента	Левая граница	Среднее число	Правая граница
1	1095	1095	1095
2	1044,431595	1078,5	1112,5684
3	1057,0125	1097	1136,9847
4	993,2554	1062,5	1131,7445
5	1012,7792	1065,400024	1118,0207
6	1027,5652	1071	1114,4347
7	1037,4242	1074,1428	1110,8613
8	1036,4107	1069,25	1102,0892
9	1034,8072	1064,5555	1094,3038
10	1039,4111	1066	1092,588
11	1037,0522	1061,54541	1086,0385
12	1039,4559	1061,916626	1084,377
13	1044,2655	1061,230713	1088,195
14	1047,5455	1068,214	1088,882
15	1049,5444	1068,8666	1088,188
16	1052,9881	1071,75	1090,511
17	1053,8672	1071,5294	1089,1916
18	1052,76	1069,7221	1086,6839
19	1052,0031	1068,2631	1084,523
20	1053,5447	1069,05	1084,5553

Рис. 4. Табличное представление фрагмента результатов

СМО является неотъемлемым звеном в транспортной системе, позволяя моделировать такие процессы, как обслуживание пассажиров, с целью оптимизации положений, происходящих на автобусной остановке, при помощи прикладных методов исследования [19; 20].

При мониторинге статистики процесса видно, что с увеличением количества прогонов левая граница доверительного интервала увеличивается, а правая уменьшается.

График зависимости влияния на математическое ожидание выходного параметра от количества проведенных экспериментов представлен на рис. 5. Рис. 5 показывает изменение распределения случайной переменной. Видно, что с увеличением количества экспериментов значения левой и правой границ приближаются к среднему значению. С увеличением количества экспериментов значения модели перестают колебаться и не изменяются при значениях свыше 60 экспериментов, также они попадают в границы доверительного интервала с уровнем значимости 90 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

По результатам исследования смоделирован процесс компьютерной обработки информации с использованием языка программирования C++. Был разработан алгоритм работы системы, а также определены входные и выходные данные. Предлагаемая модель является многофункциональной, так как в ней может быть смоделировано огромное количество вариантов работы системы: любое число в качестве максимального количества приездов и любое количество прогонов, что позволяет объективно оценить смоделированный процесс.

Данная модель позволяет планировать события на автобусной остановке. Такую модель можно «проиграть» во времени как для одного испытания, так и для заданного их множества. При этом результаты будут определяться случайным характером процессов. По этим данным можно получить достаточно устойчивую статистику, достигая равномерности нагрузки каналов и динамичности заданного маршрута, что, в свою очередь, позволит оптимизировать транспортный бизнес и с пользой вкладывать денежные средства.

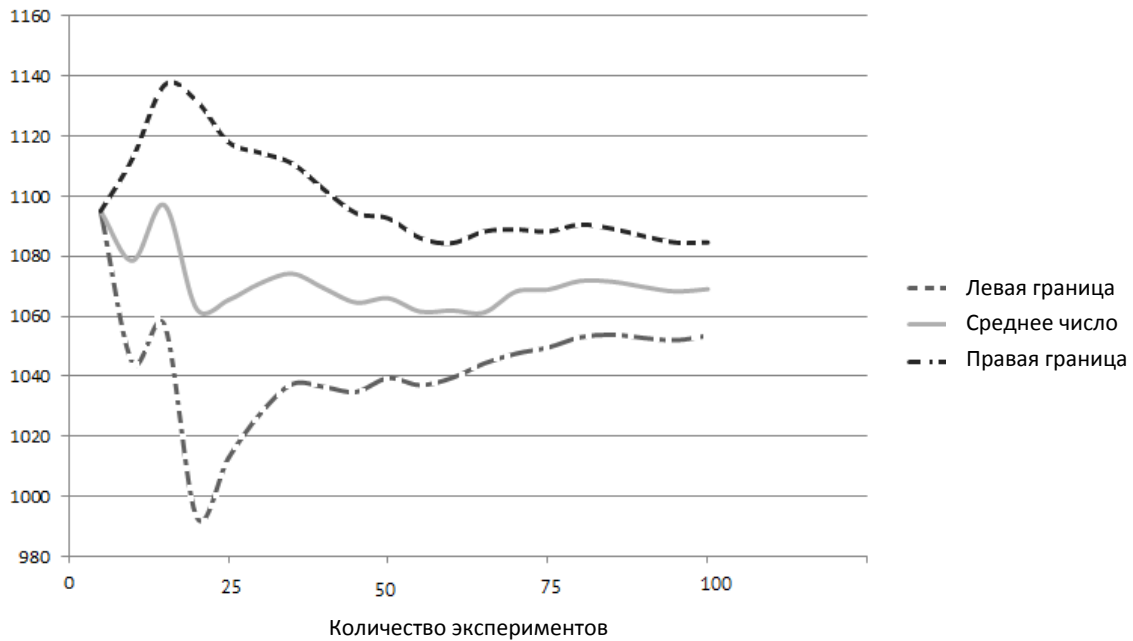


Рис. 5. Зависимость математического ожидания выходного параметра от количества экспериментов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе дальнейшего исследования планируется развивать постановку задачи с учетом нестационарной динамики пассажиропотока, неравномерного распределения автобусов по маршрутам, пробок на дорогах, влияющих на время перевозки пассажиров. Для этого будет моделироваться работа множества остановок автобусов и весь суточный пассажиропоток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логинова Н.А., Пырванов Х.П. Организация предпринимательской деятельности на транспорте. М.: Инфра-М, 2013. 260 с.
2. Джаарбеков С.М. Бухгалтерский учет, налоги, хозяйственное право. М.: СБИ, 2001. 733 с.
3. Миротин Л.Б. Логистика в автомобильном транспорте. М.: ФЕНИКС, 2015. 240 с.
4. Троицкая Н.А., Чубуков А.Б. Единая транспортная система. М.: Академия, 2013. 240 с.
5. Российский статистический ежегодник. 2017: статистический сборник. М.: Росстат, 2017. 725 с.
6. Cats O., Larijani A., Koutsopoulos H.N., Burghout W. Impacts of Holding Control Strategies on Transit Performance. *Bus Simulation on Transit Performance // Transportation Research Record*. 2011. № 2216. P. 51–58.
7. Guial K.L.L., Bantang J.Y., Saloma C.A. Identifying crucial transient traffic intensity in a queuing system // *Proceedings of the Samahang Pisika ng Pilipinas*. Philippines: Western Digital, 2017. P. 20–25.
8. Andersson P.-A., Hermansson A., Tengvald E., Scalia-Tomba G.-P. Analysis and simulation of an urban bus route // *Transportation Research Part A: General*. 1979. Vol. 13. № 6. P. 439–466.
9. Stepanchenko I.V., Krushel E.G., Panfilov A.E. The Passengers' Turnout Simulation for the Urban Transport System Control Decision-Making Process // *Communications in computer and information science: conference on creativity in intelligent technologies and data science*. Volgograd: Springer Link, 2017. P. 389–398.
10. Юдин С.В. Математика и экономико-математические модели. М.: Инфра-М, 2016. 376 с.
11. Stubbs P.C., Tyson W.J., Dalvi M.Q. *Transport Economics*. London: Routledge, 2017. 226 p.
12. Ерофеенко В.Т., Козловская И.С. Уравнения с частными производными и математические модели в экономике. М.: Огни, 2016. 310 с.
13. Wallis I., Lawrence A. Forecasting Perth's public transport patronage: econometric analysis and model development // *Australasian Transport Research Forum*. Australia: Department of Infrastructure and Regional Development, 2016. P. 15–22.
14. Абланская Л.В., Бабешко Л.О., Баусов Л.И. Экономико-математическое моделирование. М.: Экзамен, 2014. 800 с.
15. Zhao F., Li M.-T., Chow L.-F., Zhang H. Simulation Model for Estimating Bus Dwell Time by Simultaneously Considering Numbers of Disembarking and Boarding Passengers // *Transportation Research Record*. 2006. № 1971. P. 59–65.
16. Bakul K., Pal M. Bulk Service Queuing System with Impatient Customers: A Computational Approach // *Thailand Statistician*. 2017. Vol. 15. № 1. P. 1–10.
17. Lee D.H. A note on the optimal pricing strategy in the discrete-time Geo/Geo/1 queuing system with sojourn time-dependent reward // *Operations Research perspectives*. 2017. Vol. 4. P. 113–117.
18. Graham B.S. An econometric model of network formation with degree heterogeneity // *Econometrica*. 2017. Vol. 85. № 4. P. 1033–1063.
19. Caspersen E., Johansen B.G., Hovi I.B., Jong G. Norwegian Logistics Model: Moving from a deterministic framework to a random utility model // *TOI Report*. 2016. № 1538. P. 60–69.
20. Cowie J., Ison S. *The Routledge Handbook of Transport Economics*. London: Routledge, 2018. 440 p.

REFERENCES

1. Loginova N.A., Pyrvanov Kh.P. *Organizatsiya predpriimatel'skoy deyatel'nosti na transporte* [The organization of business activity in transport]. Moscow, Infra-M Publ., 2013. 260 p.
2. Dzhaarbekov S.M. *Bukhgalterskiy uchet, nalogi, khozyaystvennoe pravo* [Accounting, taxes, business law]. Moscow, SBI Publ., 2001. 733 p.
3. Mirotin L.B. *Logistika v avtomobilnom transporte* [Logistics in road transport]. Moscow, FENIKS Publ., 2015. 240 p.
4. Troitskaya N.A., Chubukov A.B. *Edinaya transportnaya sistema* [Integrated transport system]. Moscow, Akademiya Publ., 2013. 240 p.
5. *Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik. 2017* [Russian statistical sourcebook. 2017]. Moscow, Rosstat Publ., 2017. 725 p.
6. Cats O., Larijani A., Koutsopoulos H.N., Burghout W. Impacts of Holding Control Strategies on Transit Performance. *Bus Simulation on Transit Performance. Transportation Research Record*, 2011, no. 2216, pp. 51–58.
7. Guial K.L.L., Bantang J.Y., Saloma C.A. Identifying critical transient traffic intensity in a queuing system. *Proceedings of the Samahang Pisika ng Pilipinas*. Philippines, Western Digital Publ., 2017, pp. 20–25.
8. Andersson P.-A., Hermansson A., Tengvald E., Scalia-Tomba G.-P. Analysis and simulation of an urban bus route. *Transportation Research Part A: General*, 1979, vol. 13, no. 6, pp. 439–466.
9. Stepanchenko I.V., Krushel E.G., Panfilov A.E. The Passengers' Turnout Simulation for the Urban Transport System Control Decision-Making Process. *Communications in computer and information science: conference on creativity in intelligent technologies and data science*. Volgograd, Springer Link Publ., 2017, pp. 389–398.
10. Yudin S.V. *Matematika i ekonomiko-matematicheskie modeli* [Mathematics and economic-mathematical models]. Moscow, Infra-M Publ., 2016. 376 p.
11. Stubbs P.C., Tyson W.J., Dalvi M.Q. *Transport Economics*. London, Routledge Publ., 2017. 226 p.
12. Erofeenko V.T., Kozlovskaya I.S. *Uravneniya s chastnymi proizvodnymi i matematicheskie modeli v ekonomike* [Partial differential Equations and mathematical models in Economics]. Moscow, Ogni Publ., 2016. 310 p.
13. Wallis I., Lawrence A. Forecasting Perth's public transport patronage: econometric analysis and model development. *Australasian Transport Research Forum*. Australia, Department of Infrastructure and Regional Development Publ., 2016, pp. 15–22.
14. Ablanskaya L.V., Babeshko L.O., Bausov L.I. *Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie* [Economic-mathematical modeling]. Moscow, Ekzamen Publ., 2014. 800 p.
15. Zhao F., Li M.-T., Chow L.-F., Zhang H. Simulation Model for Estimating Bus Dwell Time by Simultaneously Considering Numbers of Disembarking and Boarding Passengers. *Transportation Research Record*, 2006, no. 1971, pp. 59–65.
16. Bakul K., Pal M. Bulk Service Queuing System with Impatient Customers: A Computational Approach. *Thailand Statistician*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 1–10.
17. Lee D.H. A note on the optimal pricing strategy in the discrete-time Geo/Geo/1 queuing system with sojourn time-dependent reward. *Operations Research perspectives*, 2017, vol. 4, pp. 113–117.
18. Graham B.S. An econometric model of network formation with degree heterogeneity. *Econometrica*, 2017, vol. 85, no. 4, pp. 1033–1063.
19. Caspersen E., Johansen B.G., Hovi I.B., Jong G. Norwegian Logistics Model: Moving from a deterministic framework to a random utility model. *TOI Report*, 2016, no. 1538, pp. 60–69.
20. Cowie J., Ison S. *The Routledge Handbook of Transport Economics*. London, Routledge Publ., 2018. 440 p.

THE FORMULATION OF THE ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODEL OF SERVING SYSTEM ON THE EXAMPLE OF PUBLIC TRANSPORT BUS TRAFFIC MANAGEMENT

© 2018

M.V. Kravtsova, postgraduate student

National Research University "Higher School of Economics", Moscow (Russia)

Keywords: simulation model; serving system; public transport bus run; transport system; passenger traffic.

Abstract: The paper considers and implements a serving system on the example of a particular management task of the system of a public transport bus run. This system plays the important role in the sphere of economics and everyday life where, on the one hand, mass requirements for the performance of certain services occur, and, on the other hand, these requests are being satisfied. The author determined the principles of the operational efficiency of the system, which affect the optimization of traffic flow, defined the basic elements and developed the algorithm of work of the system with the formation of input and output data. The paper formulates the economic and mathematical model, where with the help of specially developed software code and using the possibilities of C++ tools, the modeling happens, particularly, in terms of satisfaction of passenger requirements coming into this system. Special features are taken into account within the computer program that makes the simulation model an effective tool for decision-making in the conditions of uncertainty. In addition to the description of the model, the paper presents the results of the calculations in graphical and tabular views to use them for the visual demonstration of the options of the situation results. The simulation model, which imitates the passenger pick-up and drop-off, is designed to collect the queue statistics and to find the random variable distribution. According to the results of the study, the solution of the task for simulation of the events at the bus stop is received. This model gives an opportunity to plan the events at the bus stop in order to achieve the uniformity of load and the route dynamism, to identify the capacity problems that have the negative impact on the transport cycle operation.