УДК 656
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-248-261

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ОСТАНОВОЧНЫХ ПУНКТОВ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

А.И. Фадеев, Е.В. Фомин, С. Алхуссейни
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *Одним из важнейших параметров транспортной системы является пропускная способность линий, которая на городском пассажирском транспорте обычно обусловливается пропускной способностью остановочных пунктов. При определении пропускной способности остановочных пунктов необходимо учитывать случайный характер потоков транспортных средств и процесса посадки (высадки) пассажиров.*
В настоящей работе остановочный пункт рассматривается как многоканальная однофазовая система массового обслуживания (СМО) с очередью. На этой основе предлагается и обосновывается подход к определению пропускной способности остановочных пунктов городского пассажирского транспорта.
Материалы и методы. *Рассматриваются две математические модели остановочного пункта как СМО: аналитическая и имитационная. С учетом анализа результатов, полученных по этим моделям, предлагаются рекомендации для расчета реальной пропускной способности остановочного пункта.*
Результаты. *В настоящей статье на примере конкретного остановочного пункта оценивается работоспособность предложенных математических моделей и формулируются рекомендации для определения его пропускной способности.*
Обсуждение и заключение. *Предложенный порядок определения пропускной способности остановочных пунктов, состоящий из выявления критических остановочных пунктов с наибольшим пассажирооборотом, определения параметров процесса обслуживания подвижного состава, расчета вероятности возникновения очереди позволяет устанавливать предельную интенсивность движения по линиям городского пассажирского транспорта.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *остановочный пункт, пропускная способность остановочного пункта, время посадки (высадки) пассажиров, система массового обслуживания, моделирование остановочного пункта.*

Поступила 04.04.2020, принята к публикации 24.04.2020.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Фадеев А.И., Фомин Е.В., Алхуссейни С. Определение пропускной способности остановочных пунктов городского пассажирского транспорта. *Вестник СибАДИ.* 2020; 17 (2): 248-261. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-248-261

© Фадеев А.И., Фомин Е.В., Алхуссейни С.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-248-261

DETERMINATION OF THE THROUGHPUT CAPACITY OF STOP POINTS OF URBAN PUBLIC TRANSPORT

Aleksandr I. Fadeev, Evgeny V. Fomin, Sami Alhusseini
The Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. *One of the most important parameters of the transport system is the capacity of line, which in urban public transport system is usually determined by the stop points throughput capacity. When determining the throughput capacity of stop points, it is necessary to consider the random nature of the transport flows at the stop and the process of boarding and alighting passengers.*
In this work, the stop point is considered as a multi-channel single-phase queuing system (QS). On this basis, an approach to determining the throughput capacity of stop points in urban passenger transport is proposed and justified.
Materials and methods. *Two mathematical models of a stop point as QS are considered: analytical and simulation. Based on the obtained analysis results from these models, recommendations are offered for calculating the actual throughput capacity of a stop point.*
Results. *In this article, as example a specific stop points are taken, to evaluate the performance of the proposed mathematical models and formulate recommendations to determine its throughput capacity.*
Discussion and conclusion. *The proposed procedure for determining the stop points throughput capacity, consisting of identifying critical stop points with the highest passengers traffic, determining the service process parameters of fleet, and calculating the probability of queue occurrence, allows to set the maximum traffic intensity for the lines of urban public transport.*

KEYWORDS: *stop point; traffic interval; stop points throughput capacity; bus service time; queuing system.*

Submitted 04.04.20120, revised 24.04.2020.
The authors have read and approved the final manuscript.
Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Fadeev A.I., Fomin E.V., Alhusseini S. Determination of the throughput capacity of stop points in urban public transport. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2020; 17 (2): 248-261. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-248-261

© Fadeev A.I., Fomin E.V., Alhusseini S.

Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших параметров транспортной системы является пропускная способность линий, которая на городском пассажирском транспорте обычно обусловливается пропускной способностью остановочных пунктов [1, 2].

С целью исследования пропускной способности работа остановочного пункта описывается как многоканальная однофазовая система массового обслуживания (СМО) с очередью (рисунок 1). В систему с интенсивностью λ поступает поток заявок на обслуживание – транспортные средства для посадки (высадки) пассажиров. Каналом обслуживания является остановочное место подвижного состава на остановочном пункте. μ_i – производительность (интенсивность обслуживания) *i*-го канала. На данную СМО нецелесообразно накладывать ограничения по длине очереди и времени ожидания заявки в очереди.

Производительность (интенсивность обслуживания) канала обслуживания имеет случайный характер, который описывается одним из статистических законов, например, гамма-распределением, логарифмически нормальным распределением [2], показательным распределением [3, 4], распределением Эрланга [5] и т.д.

Во многих работах исследовались операции посадки (высадки) пассажиров на остановочных пунктах [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. Время нахождения транспортного средства на остановочном пункте можно разделить на несколько элементов [6], например, торможения, разгона транспортного средства, посадки (высадки) пассажиров [7], открытия–закрытия дверей [8] и т.д. В некоторых работах (например [9, 10]) предлагается определять элементы времени нахождения транспортного средства на остановочном пункте посредством регрессионных зависимостей.

В работах [1, 3, 4, 5, 9, 10] установлено, что остановочные места остановочных пунктов имеют неодинаковую производительность: первое место обладает наибольшей производительностью, производительность каждого последующего места снижается. В этой связи введено понятие «эффективное количество остановочных мест», которое соответствует условному количеству мест с пропускной способностью первого остановочного места [1, 3, 4, 5, 9, 10].

Таким образом, с учетом неодинаковой производительности остановочных мест поток обслуженных заявок имеет интенсивность

$$\mu = \sum_{i=1}^{m} \mu_i = k_m \mu', \qquad (1)$$

где *m* – количество занятых каналов обслуживания;

μ_i – производительность (интенсивность обслуживания) *i*-го канала;

k_m – коэффициент приведения к интенсивности обслуживания первого канала (μ') при *n* занятых каналах обслуживания ($k_1 = 1; k_2 \le 2; \ldots$).

В некоторых работах (например [9]) пропускная способность остановочного пункта определяется как величина, обратная математическому ожиданию среднего времени обслуживания одной заявки.

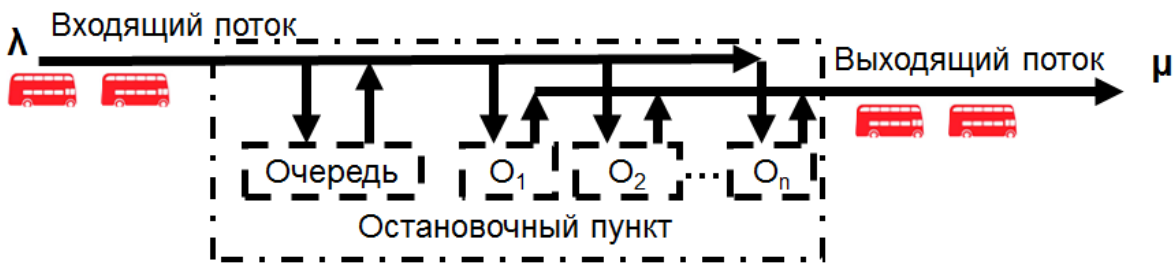


Рисунок 1 – Схема остановочного пункта как СМО
$O_1,\ldots,O_n$ – каналы обслуживания

Figure 1 – Diagram of a stop point as a QS
O1,...,On – service channels (stopping places)

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Очевидно, что такая величина предельной пропускной способности не может использоваться на практике, т.к. в этом случае СМО неработоспособна[1], по теории в системе формируется очередь заявок неограниченной длины.

Реальная пропускная способность остановочного пункта при условии нормального функционирования системы меньше упомянутой предельной величины. Для расчета реальной пропускной способности с учетом случайного характера процессов поступления заявок и их обслуживания в некоторых работах предлагается использовать соответствующие коэффициенты [1, 9, 21]. Например, в работе [9] применяется коэффициент неравномерности входящего потока заявок, определенный как отношение максимальной зафиксированной интенсивности потока транспортных средств к средней интенсивности за расчетный период. В работе [1] используется коэффициент вероятности отказа в заявке на обслуживание и коэффициент вариации времени обслуживания пассажиров на остановочном пункте. Однако не доказано, что применение рассматриваемых коэффициентов во всех случаях обеспечивают получение приемлемых для практики результатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе рассматриваются две математические модели остановочного пункта как СМО: аналитическая и имитационная. С учетом анализа результатов, полученных по этим моделям, предлагаются рекомендации для расчета реальной пропускной способности остановочного пункта.

Данная СМО является разомкнутой. Для таких систем с непрерывным потоком требований и неограниченным временем ожидания обслуживания характерны следующие особенности функционирования:

– при наличии свободного канала поступающее требование, поступившее в систему, немедленно начинает обслуживаться;

– если все *n* каналов обслуживания заняты, требование помещается в очередь ожидания обслуживания;

– после освобождения канала обслуживания следующее требование выбирается из очереди в соответствии с установленной дисциплиной, чаще всего выбор осуществляется по принципу «первым пришел – первым обслуживается»;

– очередь требований, ожидающих обслуживания, не ограничена.

Аналитическая модель применима для простейшего потока (стационарного потока без последействия), пуассоновского распределения потока требований и показательного закона распределения времени обслуживания. В противном случае применяется имитационная модель [22, 23, 24, 25].

В работах [3, 4] получены следующие расчетные зависимости параметров рассматриваемой СМО при установившемся режиме с учетом неодинаковой производительности остановочных мест:

вероятность отсутствия требований в системе

$$P_0 = (1 + \sum_{i=1}^{n} \frac{\rho^i}{\prod_{i=1}^{n} k_i} + \frac{\rho^{n+1}}{\prod_{i=1}^{n} k_i \cdot (k_n - \rho)})^{-1}, \quad (2)$$

где $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$;

вероятность очереди в системе

$$P_{\text{wt}} = P_0 \frac{\rho^n}{\prod_{i=1}^{n} k_i} \cdot \frac{1}{(1 - \frac{\rho}{k_n})}, \quad (3)$$

средняя длина очереди

$$\bar{l}_{\text{wt}} = P_0 \frac{\rho^{n+1}}{\prod_{i=1}^{n-1} k_i \cdot (k_n - \rho)^2}. \quad (4)$$

Данные зависимости имеют смысл при условии $\frac{\rho}{k_n} < 1$.

Предлагается следующая методика имитационного моделирования остановочного пункта общественного транспорта.

Известны три принципа имитационного моделирования, которые различаются по организации последовательности обрабатываемых событий[2]. Во-первых, принцип последовательной проводки заявки, в соответствии с которым для каждой поступающей заявки осуществля-

[1] Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ./ Пер. И.И. Глушко; ред. В.И. Нейман. М.: Машиностро-е-ние, 1979. 432 с.

[2] Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. Главная редакция физико-математических наук. М.: Наука, 1978. 402 с.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ется расчет всех операций обслуживания: заявка последовательно проводится через операции обслуживания. Преимущества данного подхода – простота реализации. К основным недостаткам можно отнести неприменимость для сложных систем.

Во-вторых, принцип Δt: временная ось делится на равные промежутки (Δt), в которых формируются события, изменяющие состояние системы. Основная проблема данного подхода: задание интервала Δt. Слишком малый интервал приводит к увеличению времени моделирования, при увеличении Δt повышается погрешность моделирования.

В-третьих, принцип, основывающийся на определении времени ближайшего события. Такой подход считается наиболее эффективным.

В данной работе имитационная модель остановочного пункта формулируется на основе принципа последовательной проводки заявки. В системе имеется два случайных процесса: поступления заявок, обслуживания заявок.

Время поступления *i*-й заявки формируется следующим образом:

$$t_i^{\lambda} = t_{i-1}^{\lambda} + \tau_i^{\lambda}, \qquad (5)$$

τ_i^{λ} – случайный интервал времени между заявками, поступающими в систему, определяемый в соответствии с заданным законом распределения.

Время завершения обслуживания заявки

$$t_j^{\mu} = t_i^{b} + \tau_j^{\mu}, \qquad (6)$$

где t_j^{b} – время начала обслуживания (постановки заявки на обслуживание);

τ_j^{μ} – случайная продолжительность обслуживания заявки, определенная в соответствии с заданным законом распределения.

На рисунке 2 приведена схема изменения состояний СМО. Событиями, влияющими на состояние системы, являются поступление и завершение обслуживания заявки. Очередь в системе возникает, если количество необслуженных заявок превышает число каналов обслуживания. Множество заявок ***A***, находящихся в системе, описывается следующим реляционным отношением:

$$A(I, T^i, T^s, T^o), \qquad (7)$$

где I – Id заявки на обслуживание;

T^i, T^s, T^o – время поступления, начала обслуживания и завершения обслуживания заявки.

В системе *n* каналов обслуживания, t_j^{μ} – время освобождения *j*-го канала обслуживания ($j = \overline{1,n}$). Известны статистические законы поступления и обслуживания заявок.

Алгоритм имитационного моделирования функционирования остановочного пункта:

1. Инициализация системы:

– количество каналов обслуживания;

– закон распределения входящего потока заявок;

– закон распределения времени обслуживания заявок каждым каналом;

– время освобождения каналов устанавливается в 0 (все каналы свободны).

2. Определение случайного (распределенного соответствующим образом) момента времени поступления заявки t_i. Расчет атрибутов кортежа a_k заявки следующим образом:

2.1. Время поступления заявки $t_k^i = t_i$.

2.2. Определение момента времени начала обслуживания заявки. Для этого выбирается канал обслуживания с наименьшим временем освобождения $t_j^{\mu} = Min(t_i^{\mu}), i = \overline{1,n}$.

Таким образом, время начала обслуживания

$$t_k^s = \begin{cases} t_k^i, & \text{если } t_k^i >= t_j^{\mu} \\ t_k^{\mu}, & \text{если } t_k^i < t_j^{\mu} \end{cases} \qquad (8)$$

2.3. Рассчитывается время завершения обслуживания заявки

$$t_k^o = t_k^s + \tau_j^{\mu}, \qquad (9)$$

где τ_j^{μ} – продолжительность обслуживания заявки *j*-м каналом, определённая в соответствии с определенным случайным законом.

Время освобождения *j*-го канала $t_j^{\mu} = t_k^o$.

3. Проверка условия завершения моделирования $t_i > T$. Если условие выполняется, моделирование завершено, осуществляется расчет результатов моделирования.

В обратном случае – переход к п. 2.

Расчет параметров функционирования СМО по результатам имитационного моделирования осуществляется следующим образом:

1. Вероятность отсутствия требований в системе

$$P_0 = T_0 / T, \qquad (10)$$

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

где T_0 – суммарное время нахождения системы в состоянии S_0 в процессе моделирования;

T – общая длительность имитации.

2. Вероятность очереди в СМО

$$P_{wt} = \sum_{i>n} T_i / T \,, \qquad (11)$$

где T_i – суммарное время нахождения системы в состоянии S_i

3. Средняя длина очереди

$$l_{wt} = \frac{\sum_{i>n} iT_i}{\sum_{i>n} T_i} \,. \qquad (12)$$

4. Суммарное время нахождения системы в состоянии S_i

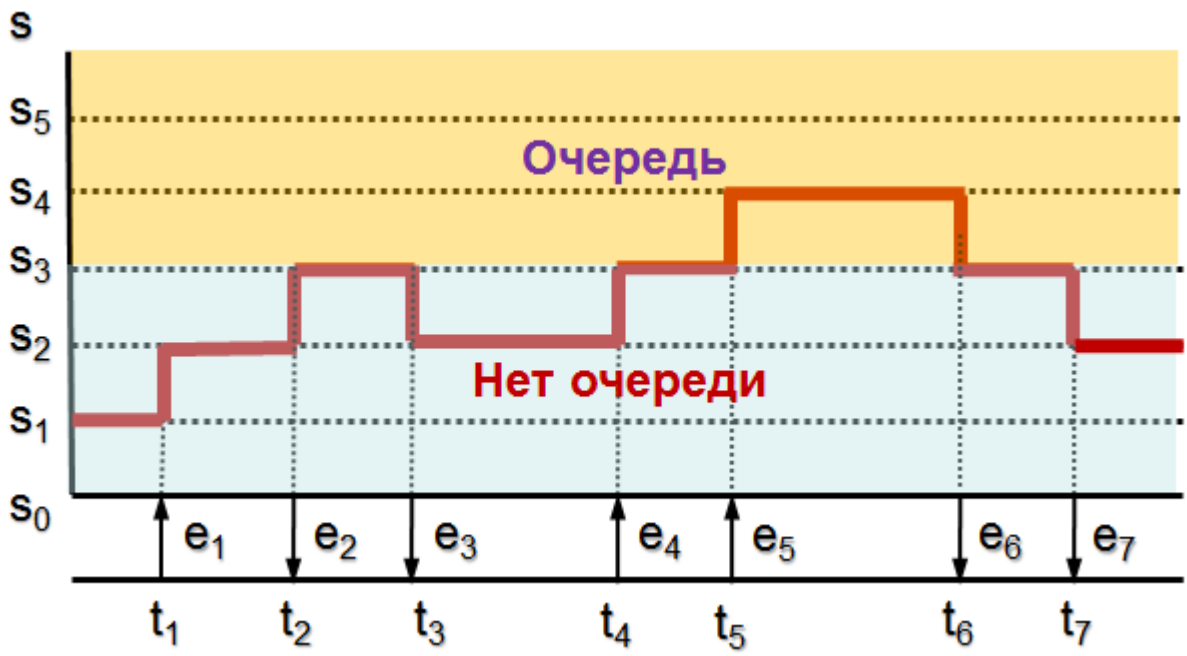
$$T_i = \sum_{s_{j-1,j}=i} (t_j - t_{j-1}) \,. \qquad (13)$$

В настоящей статье на примере конкретного остановочного пункта оценивается работоспособность предложенных математических моделей и формулируются рекомендации для определения его пропускной способности. На основе выборки длительности обслуживания заявок устанавливается[3]:

– теоретический закон распределения процесса обслуживания транспортных средств на остановочном пункте;

– зависимость времени обслуживания заявки от номера остановочного места на остановочном пункте.

В таблицах 1, 2 приведены результаты обработки выборки длительности обслуживания заявок. Совокупность подразделена на три выборки в зависимости от номера канала обслуживания (номера места остановки на остановочном пункте). Диапазон выборки от 15 до 87 с разделен на 10 интервалов. Установлено, что, как и в других исследованиях, каналы обслуживания имеют неодинаковую производительность: среднее время обслуживания заявки возрастает с увеличением номера канала.



где s_j, $j = \overline{1,\infty}$ – состояние СМО определяемое по числу заявок в системе

Рисунок 2 – Схема изменений состояний СМО (с тремя каналами)

Figure 2 – Diagram of changes in the condition of the QS (with three channels)

[3] Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования экс-перимента. Пер. с англ. М.: Мир, 1980, 510 с.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Таблица 1
Результаты обработки экспериментальных данных случайного процесса обслуживания транспортных средств на остановочном пункте
(X_i – середина интервала; I, II, III – номер места остановки)

Table 1
Results of experimental data processing of the serving vehicles random process at the stop point
(X_i is the average interval; I, II, III is the number of the stopping place)

Интервал, с	Частота			X_i	Вероятность					
					Выборка			Оценка		
	I	II	III		I	II	III	I	II	III
15–23	6	3	3	19	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01
23–31	32	27	14	27	0,16	0,13	0,09	0,08	0,07	0,06
31–39	46	50	30	35	0,22	0,25	0,20	0,17	0,16	0,14
39–47	46	36	30	43	0,22	0,18	0,20	0,22	0,22	0,20
47–55	27	31	25	51	0,13	0,15	0,17	0,20	0,20	0,21
55–63	24	23	21	59	0,12	0,11	0,14	0,14	0,15	0,16
63–71	13	13	13	67	0,06	0,06	0,09	0,09	0,09	0,11
71–79	7	12	9	75	0,03	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06
79–87	5	6	4	83	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03
ИТОГО:	206	201	149		1,00	1,00	1,00	0,98	0,98	0,98

На рисунке 3 дана гистограмма распределения времени обслуживания заявок каждым каналом. Из рисунка 3 видно, что рассматриваемый случайный процесс не соответствует показательному закону распределения, он подчиняется гамма-распределению с параметрами, приведенными в таблице 2. Расчетные значения критерия χ^2 не превышают критических, т.е. гипотеза о гамма-распределении времени обслуживания заявок подтверждается.

Рассматриваем случай простейшего пуассоновского потока поступления транспортных средств на остановочный пункт, хотя в общем виде предложенная имитационная модель применима для любого случайного потока поступления транспортных средств на остановочный пункт.

Таблица 2
Параметры распределения времени обслуживания транспортных средств на остановочном пункте

Table 2
The distribution parameters of serving vehicles time at the stop point

Параметры распределения	Оценка	Расчетное значение		
		Место I	Место II	Место III
Альфа (a)	9,098	8,9	9,2	9,6
Бета (b)	4,893	5,0	5,0	5,0
Математическое ожидание, с		44,51	46,22	48,10
Стандартное отклонение	14,6			
Дисперсия	218,0			

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

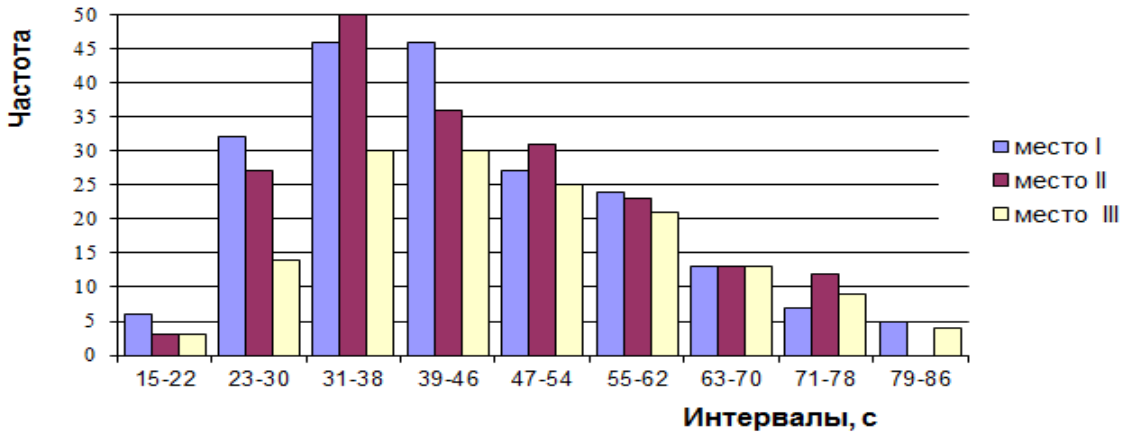


Рисунок 3 – Гистограмма распределения времени обслуживания заявок

Figure 3 – Time distribution of serving requests

Для расчета параметров функционирования остановочного пункта как СМО используются выражения (2), (3), (4) аналитической модели и (10), (11) и (12) имитационной модели. Для аналитической модели случайный процесс поступления и обслуживания заявок считается простейшим пуассоновским. В имитационной модели применяются параметры случайных процессов, соответствующие результатам обследования.

Для имитационной модели требуется определить порядок расчетов случайных интервалов между событиями, которые подчиняются заданному случайному закону. Применяются следующие методы определения случайных величин с заданным распределением: аналитический (метод обратной функции), табличный и метод композиций.

В данной работе используются первые два метода. По аналитическому методу на основании равномерно распределенной в интервале (0, 1) случайной величины рассчитывается величина, распределенная по заданному закону.

Гамма-распределение непрерывной случайной величины *x* описывается плотностью распределения

$$f(x) = \begin{cases} \dfrac{\lambda^b}{(b-1)!} x^{b-1} e^{-\lambda x}, & x > 0; \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad (14)$$

где λ, b – параметры гамма-распределения ($\lambda > 0, b > 0, a = 1/\lambda$).

Если *b* принимает целочисленные значения, гамма-распределение называется распределением Эрланга.

Математическое ожидание рассчитывается[4]

$$m_x = b/\lambda. \quad (15)$$

Гамма-распределение сводится к экспоненциальному распределению, если *b*=1.

В большинстве случаев вместо гамма-распределения можно использовать распределение Эрланга. Случайная величина *x*, имеющая распределение Эрланга, – это сумма независимых случайных величин x_i, имеющих экспоненциальное распределение, т.е.:

$$x = \sum_{i=1}^{b} x_i . \quad (16)$$

Машинный алгоритм для имитации гамма-распределения[5]

$$x = \sum_{i=1}^{b} \left(-\frac{1}{\lambda} \ln R_i\right) = -\frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^{b} \ln R_i = -\frac{1}{\lambda} \ln\left(\prod_{i=1}^{b} R_i\right), \quad (17)$$

[4] Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. Пер. с англ. М.: Мир, 1980, 510 с

[5] Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

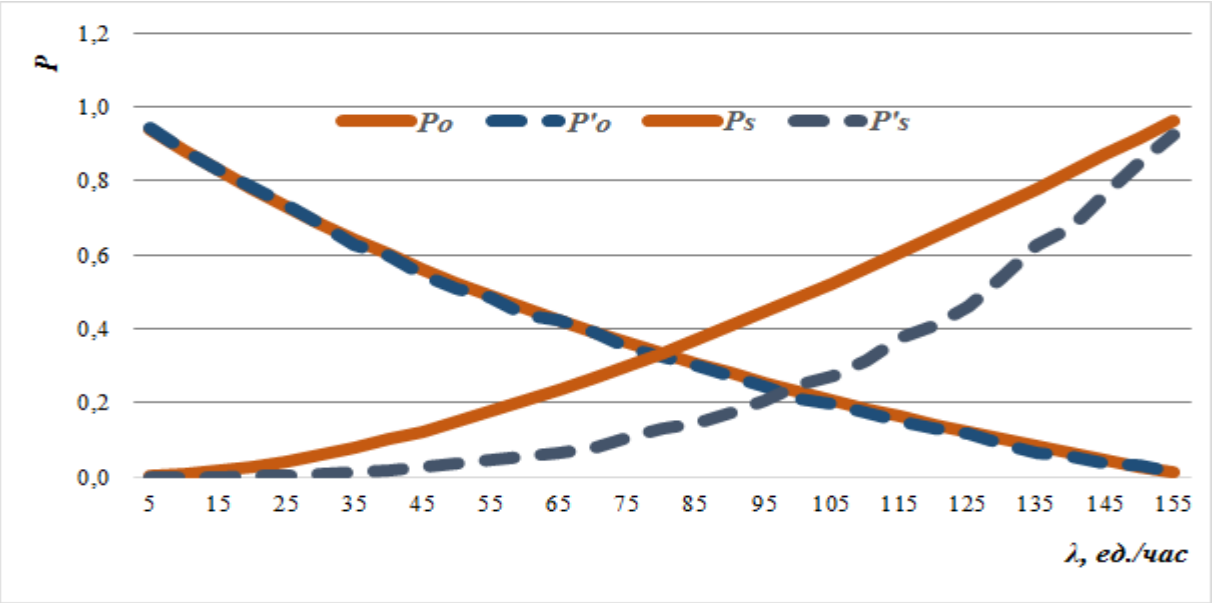
где R_i – равномерно распределенное случайное число.

Машинный алгоритм (17) используется как для показательного, так и для гамма-распределения (в случае показательного распределения *b*=1).

На рисунке 4 даны сравнительные результаты расчетов параметров СМО с применением аналитической и имитационной модели для остановочного пункта с двумя остановочными местами. Интенсивность входящего потока заявок варьировалась с 5 единиц в час до предела пропускной способности СМО с шагом 5 единиц. Функционирование системы для каждой интенсивности входящего потока моделировалось в течение 100 ч условного (машинного) времени. Для СМО с двумя каналами обслуживания (см. рисунок 4) предел пропускной способности составил 155 единиц в час.

Из рисунка 4 видно: значения вероятности отсутствия заявок в очереди, полученные из аналитических расчетов P_o, практически совпадают с имитационным моделированием $P_o^{'}$. Однако вероятность очереди в системе, определенная из аналитической модели P_s, значительно отличается от имитационного моделирования $P_s^{'}$. Таким образом, для расчета параметров остановочного пункта аналитическую модель следует использовать исключительно при простейших пуассоновских случайных процессах поступления и обслуживания транспортных средств. Для других случаев необходимо применять имитационную модель.

Рассматриваем результаты имитационного моделирования остановочного пункта, варьируя количеством остановочных мест от 1 до 3. На рисунке 5 приведены зависимости вероятности отсутствия заявок в системе P_o и вероятность очереди P_s для рассматриваемых вариантов остановочного пункта при варьировании интенсивности заявок от 5 заявок в час до предела пропускной способности. Получены следующие предельные значения пропускной способности рассматриваемых вариантов конфигурации остановочного пункта: 80 единиц в час для одного остановочного места, 155 единиц в час – двух мест и 230 единиц в час для трех мест соответственно.



где

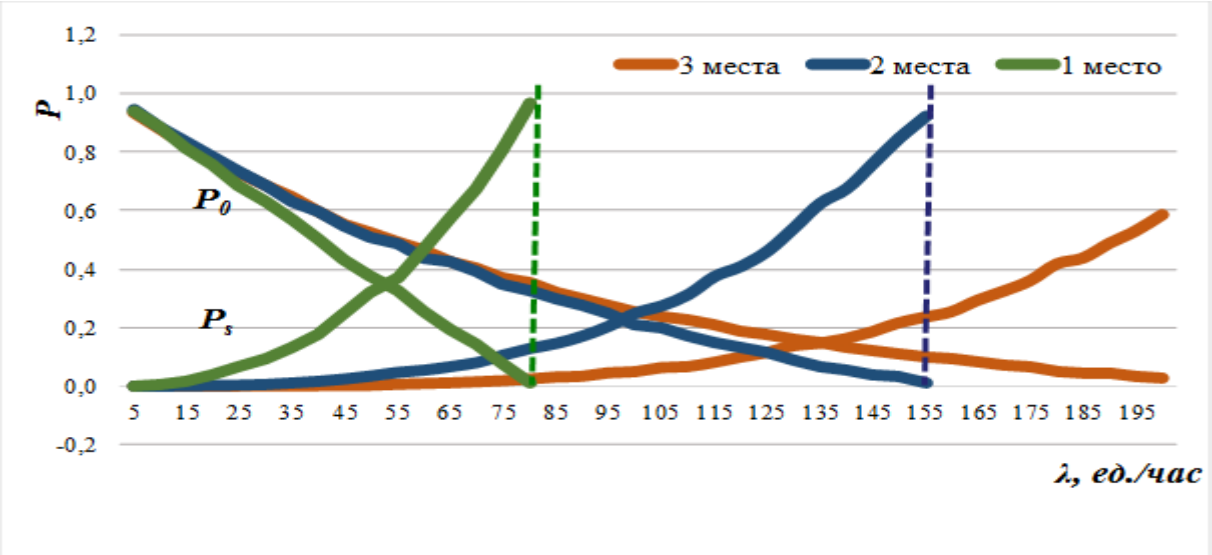
P_o, $P_o^{'}$ – вероятность отсутствия заявок в системе по аналитической и имитационной модели соответственно;

P_s, $P_s^{'}$ – вероятность очереди заявок по аналитической и имитационной модели соответственно

Рисунок 4 – Зависимость вероятности отсутствия заявок в системе и наличия очереди от интенсивности поступления требований (λ)

Figure 4 – The dependence of the probability of requests absence in the system and the probability of queue occurrence on service requests flow intensity (λ)

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal



где

P_o - вероятность отсутствия заявок в системе; P_s - вероятность очереди

Рисунок 5 – Параметры функционирования остановочного пункта при различном количестве остановочных мест (от 1-го до 3-х остановочных мест)

Figure 5 – Parameters of the stop point functioning for a different number of stopping places (from 1 to 3 stopping places)

Очевидно, что на практике применение предельных пропускных способностей остановочного пункта недопустимо. На остановочном пункте будет постоянно присутствовать очередь транспортных средств, которая заблокирует улично-дорожную сеть. Остановочный пункт должен иметь запас пропускной способности для бесперебойного функционирования маршрутной сети.

Нормальным (наиболее эффективным) режимом функционирования остановочных пунктов является отсутствие очереди. Очереди транспортных средств на остановочный пункт приводят к негативным процессам, существенно снижающим пропускную способность улично-дорожной сети и уровень безопасности дорожного движения. Предлагается пропускную способность остановочного пункта определять по критерию отсутствия очереди, применяя стандартные в статистике уровни значимости вероятности очереди 10%, 5% и 1%. Аналогичный подход применен в *HCM* 2010 [1], в котором нормируется вероятность отказа транспортному средству в обслуживании (заняты все остановочные места) при условии нормального распределения времени обслуживания пассажиров.

В таблице 3 даны параметры пропускной способности остановочного пункта, полученные по результатам имитационного моделирования. Для конфигурации остановочного пункта из одного, двух и трех остановочных мест для уровней значимости P_{s1} 0,01, 0,05 и 0,1 приведены вероятности отсутствия заявок в системе (P_o), вероятности очереди из двух (P_{s2}), трех (P_{s3}) и четырех (P_{s4}) заявок. Из таблицы 3 видно, что пропускная способность остановочного пункта при уровне значимости вероятности очереди P_{s1}=0,01 обеспечивает функционирование остановочного пункта практически без очередей. Только 1% времени на остановочном пункте наблюдается очередь, длина которой не превышает одну заявку. При уровне значимости вероятности очереди P_{s1}=0,05 в системе порядка 1% времени будет наблюдаться очередь из двух заявок. Уровень значимости P_{s1}=0,1 предполагает работу системы с очередью в 10% времени, в 2–3% времени очередь будет состоять из 2 заявок, а в 1% времени – из трех заявок.

Таким образом, пропускную способность системы, исходя их уровня значимости вероятности очереди в 1%, следует устанавливать для случаев существенного влияния очереди транспортных средств к остановочному пункту на улично-дорожный трафик.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Таблица 3
Параметры пропускной способности остановочного пункта

Table 3
Parameters of the stop point throughput capacity

Интенсивность λ, ед./час	Вероятность отсутствия заявок P_o	Вероятность очереди			
		Одна и более заявок P_{s1}	Две и более заявки P_{s2}	Три и более заявки P_{s3}	Четыре и более заявки P_{s4}
Одно место					
11	0,872	0,01	0,001	0,000	0,000
22	0,726	0,05	0,008	0,001	0,000
31	0,617	0,10	0,024	0,006	0,001
Два места					
34	0,641	0,01	0,001	0,000	0,000
57	0,469	0,05	0,012	0,003	0,001
74	0,358	0,10	0,031	0,010	0,003
Три места					
62	0,447	0,01	0,002	0,000	0,000
100	0,256	0,05	0,015	0,004	0,001
120	0,189	0,10	0,037	0,014	0,005

Например, если остановочный пункт расположен непосредственно после перекрестка, на улично-дорожной сети отсутствует возможность формирования очереди транспортных средств. Уровень значимости вероятности очереди 10% рекомендуется использовать в тех случаях, когда очередь транспортных средств к остановке не приводит к возникновению транспортных заторов на улично-дорожной сети.

В некоторых случаях через остановочный пункт проходят потоки транспортных средств разной вместимости [22]. Очевидно, что продолжительность посадки (высадки) пассажиров для подвижного состава неодинаковой вместимости может существенно различаться. Такие случаи описываются посредством СМО с неоднородным потоком заявок, т.е.:

– в систему поступает определенное число классов заявок (количество классов заявок соответствует числу классов вместимостей транспортных средств, проходящих через остановочный пункт);

– для каждого из классов заявок известны параметры случайных процессов поступления и обслуживания.

Приведенный в настоящей работе алгоритм имитационного моделирования остановочного пункта позволяет определить параметры его пропускной способности при неоднородном потоке заявок.

Таким образом, предлагается следующий порядок определения пропускной способности остановочных пунктов при формировании (оптимизации) программы перевозок (транспортного предложения):

– устанавливается список лимитирующих остановочных пунктов (пунктов с наибольшим пассажирооборотом) по каждому из направлений маршрутной сети;

– проводится обследование данных остановочных пунктов для расчета параметров случайных процессов поступления заявок и их обслуживания;

– с использованием аналитической или имитационной модели осуществляется расчет параметров пропускной способности рассматриваемых остановочных пунктов;

– проводится оценка результатов расчета: для направлений с недостаточной пропускной способностью принимается решение о корректировке транспортного предложения или увеличении остановочных мест, снижении интенсивности движения за счет увеличения вместимости подвижного состава и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Пропускная способность линий городского пассажирского транспорта во многом ограничивается пропускной способностью остановочных пунктов, на которую существенное влияние оказывают параметры случайных

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

процессов поступления транспортных средств и времени посадки (высадки) пассажиров.

Для расчета реальной пропускной способности в некоторых работах предлагается использовать соответствующие коэффициенты, учитывающие случайный характер процессов функционирования остановочного пункта. Однако не доказано, что применение рассматриваемых коэффициентов во всех случаях обеспечивает получение приемлемых для практики результатов.

2. Разработанная математическая модель функционирования остановочного пункта городского пассажирского транспорта как многоканальной однофазовой системы массового обслуживания с очередью позволяет определять зависимость пропускной способности остановочных пунктов от количества остановочных мест, обладающих неодинаковой производительностью, и параметров случайного процесса обслуживания подвижного состава.

3. Предложенный порядок определения пропускной способности остановочных пунктов, состоящий из выявления критических остановочных пунктов с наибольшим пассажирооборотом, определения параметров процесса обслуживания подвижного состава, расчета вероятности возникновения очереди, позволяет устанавливать предельную интенсивность движения по линиям городского пассажирского транспорта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Highway Capacity Manual 2000. ransportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C., USA, 2000. 1134 p.

2. Липенков А.В., Елисеев М.Е. Определение пропускной способности остановочного пункта городского пассажирского транспорта при непостоянном числе мест обслуживания // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. № 3. С. 79–81.

3. Фадеев А.И., Фомин Е.В. К вопросу о пропускной способности остановочных пунктов // Интегрированная логистика, издательство: Всероссийский институт научной и технической информации РАН (Москва). 2012. №2. С. 7–11.

4. Фомин Е.В., Фадеев А.И. Методика определения пропускной способности остановочных пунктов ГПТ // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. №4(63). С. 117–124.

5. Гудков В.А. К вопросу о пропускной возможности автобусных остановочных пунктов / В.А. Гудков [и др.] // Автотранспортное предприятие. 2003. № 4. С. 26 – 28.

6. Самойлович Т. Н. Длительность операций при стоянке маршрутных пассажирских транспортных средств для высадки и посадки пассажиров // Наука и техника: международный научно-технический журнал. 2013. № 3. С. 48–55.

7. Затонский А.В., Володина Ю.И. Имитационная балансовая модель остановки городского общественного транспорта // Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2013. №12. С. 70–77.

8. Липенков А.В. О результатах комплексного исследования остановочных пунктов городского пассажирского транспорта в г. Нижнем Новгороде // Мир транспорта и технологических машин. 2012. №4. С. 93–102.

9. Димова И.П., Грачев В.В. Определение пропускной способности остановочных пунктов на современном этапе развития пассажирских перевозок // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2008. № 4 (36). С. 66–70.

10. Димова И.П., Борщенко Я.А. Повышение эффективности работы городского пассажирского транспорта на основе исследования показателей работы остановочных пунктов // Наука, техника и образование. 2014. № 5 (5). С. 62–65.

11. Липенков А.В. Исследование простоев маршрутных транспортных средств в ожидании дополнительных пассажиров на остановочных пунктах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. №2 (85). С. 160–166.

12. Елисеев М.Е., Липенков А.В., Маслова О.А. О подходах к моделированию времени простоя автобусов на остановочных пунктах городского пассажирского транспорта // Мир транспорта и технологических машин. 2012. №3. С. 84–93.

13. Зедгенизов А. В. Оценка времени освобождения остановочного пункта городского пассажирского транспорта // Вестник ИрГТУ. 2007. № 4(32). С. 145–151.

14. Липенков А.В., Кузьмин Н.А., Ерофеева Л.Н. Математическая модель пропускной способности остановочного пункта в случае отсутствия маневров по обгону автобусами друг друга // Вестник Оренбургского университета. 2015. №4 (179). С. 87–94.

15. Исхаков М.М. Выбор участка на остановочном пункте для обслуживания пассажиров маршрутных транспортных средств // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 10. С. 59–63.

16. Калюжный М.В. Закономерности изменения времени простоя транспортных средств на остановочных пунктах маршрута городского пассажирского транспорта // Вестник ДИАТ. 2008. №3. С. 15–20.

17. Калюжный М.В. Моделирование продолжительности простоя транспортных средств на остановочных пунктах маршрута городского пассажирского транспорта // Вестник ДИАТ. 2009. №2. С. 14–18.

18. Зедгенизов А.В. Повышение эффективности функционирования остановочных пунктов городского пассажирского транспорта // Вестник ИрГТУ. 2008. № 3(35). С. 121–123.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

19. Зедгенизов А.В. Остановочные пункты городского пассажирского транспорта: монография ИрГТУ: LAP Lambert Academic Publishing, 2009. 120 с.

20. Zedgenizov A.V., Levashev A.G., Mikhailov A.Y., Verification of the transit stops capacity model. Networks for mobility 2008: Proceedings of the 4th International Symposium ,Stuttgart, FOVUS, 2008. pp. 23, 25.

21. Al-Mudhaffar A., Nissan A., Bang K.-L. Bus Stop and Bus Terminal Capacity. Transportation Research Procedia 14:1762-1771, 2016. pp. 1762 – 1771

22. Кажаев А.А. Имитационная модель загрузки остановочных пунктов городского маршрутного транспорта // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2011. №1. С. 86–94.

23. Елисеев М.Е., Липенков А.В., Маслова О.А. О подходах к моделированию времени простоя автобусов на остановочных пунктах городского пассажирского транспорта // Мир транспорта и технологических машин. 2012. №3. С. 84–93.

24. Сочнев А.Н. Имитационное моделирование движения маршрутных автобусов // Современные научные исследования и инновации. 2012. № 5 [Электронный ресурс]. URL: http://web.snauka.ru/issues/2012/05/12603 (дата обращения: 02.02.2020).

25. Fernandez, R., 2010. Modelling public transport stops by microscopic simulation. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 18(6). pp. 856-868.

REFERENCES

1. Highway Capacity Manual 2000. *Transportation Research Board*, National Research Council. Washington, D.C., USA, 2000. 1134 p.

2. Lipenkov A.V., Eliseev M.E. *Opredelenie propusknoj sposobnosti ostanovochnogo punkta go-rodskogo passazhirskogo transporta pri nepostojannom chisle mest obsluzhivanija* [Determination of the throughput capacity of a stopping point of urban passenger transport with a variable number of service locations]. *Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*. 2014; 3: 79-81 (in Russian).

3. Fadeev A.I., Fomin E.V. *K voprosu o propusknoj sposobnosti ostanovochnyh punktov* [The issue of stopping points capacity]. *Integrirovannaja logistika, izdatel'stvo: Vserossijskij institut nauchnoj i tehnicheskoj informacii RAN (Moscow)*. 2012; 2: 7-11 (in Russian).

4. Fomin E.V., Fadeev A.I. Metodika opredelenija propusknoj sposobnosti ostanovochnyh punktov GPT [The methodology for determining the throughput capacity of stopping points]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta.* 2012; 4(63): 117-124 (in Russian).

5. Gudkov V.A. K voprosu o propusknoj vozmozhnosti avtobusnyh ostanovochnyh punktov [The issue of bus stopping capacity]. *Avtotransportnoe predprijatie.* 2003; 4: 26 – 28. (in Russian).

6. Samojlovich T.N. Dlitel'nost' operacij pri stojanke marshrutnyh passazhirskih transportnyh sredstv dlja vysadki i posadki passazhirov [Duration of operations when fixed-route passenger vehicles stop for boarding and alighting passengers]. *Nauka i tehnika: mezhdunarodnyj nauchnotehnicheskij zhurnal*. 2013; 3: 48–55. (in Russian).

7. Zatonskij A.V., Volodina Ju.I., Imitacionnaja balansovaja model' ostanovki gorodskogo obshhestvennogo transporta [Simulation balance model of urban public transport stop]. *Gruzovoe i passazhirskoe avtohozjajstvo.* 2013; 12: 70-77 (in Russian).

8. Lipenkov A.V. O rezul'tatah kompleksnogo issledovanija ostanovochnyh punktov gorodskogo passazhirskogo transporta v g. Nizhnem Novgorode [Review the results of a comprehensive study of stopping points for urban public transport in Nizhny Novgorod]. *Mir transporta i tehnologicheskih mashin*. 2012; 4: 93-102 (in Russian).

9. Dimova I. P., Grachev V.V., Opredelenie propusknoj sposobnosti ostanovochnyh punktov na sovremennom jetape razvitija passazhirskih perevozok [Determining the capacity of stopping points at the present stage of development of passenger traffic]. *Vestnik IrGTU*. 2008; 4 (36): 66 – 70 (in Russian).

10. Dimova I.P., Borshhenko Ja.A. Povyshenie jeffektivnosti raboty gorodskogo passazhirskogo transporta na osnove issledovanija pokazatelej raboty ostanovochnyh punktov [Improving the efficiency of urban passenger transport based on a study of stopping point performance]. *Nauka, tehnika i obrazovanie*. 2014; 5 (5): 62-65 (in Russian).

11. Lipenkov A.V. Issledovanie prostoev marshrutnyh transportnyh sredstv v ozhidanii dopolnitel'nyh passazhirov na ostanovochnyh punktah [The study of dead time of fixed-route vehicles in anticipation of additional passengers at stopping points]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta.* 2014; 2 (85): 160-166 (in Russian).

12. Eliseev M.E., Lipenkov A.V., Maslova O.A. O podhodah k modelirovaniju vremeni pro-stoja avtobusov na ostanovochnyh punktah gorodskogo passazhirskogo transporta [On approaches to modeling bus time at bus stops in urban passenger transport]. *Mir trans-porta i tehnologicheskih mashin*. 2012; 3: 84-93 (in Russian).

13. Zedgenizov A. V. Ocenka vremeni osvobozhdenija ostanovochnogo punkta gorodskogo pas-sazhirskogo transporta [Estimation of the time of stopping point of urban passenger transport to be free]. *Vestnik IrGTU*. 2007; 4(32): 145-151 (in Russian).

14. Lipenkov A.V., Kuz'min N.A., Erofeeva L.N. Matematicheskaja model' propusknoj sposobnosti ostanovochnogo punkta v sluchae otsutstvija manevrov po obgonu avtobusami drug druga [A mathematical model of the throughput of a stopping point in the absence of maneuvers for overtaking each other by buses]. *Vestnik Orenburgskogo universiteta.* 2015: 4 (179): 87-94 (in Russian).

15. Ishakov M.M. Vybor uchastka na ostanovochnom punkte dlja obsluzhivanija passazhirov marshrutnyh transportnyh sredstv [Selecting a site at a stopping point for serving passengers of fixed-route vehicles]. *Vestnik*

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2011; 10: 59–63 (in Russian).

16. Kaljuzhnyj M.V. Zakonomernosti izmenenija vremeni prostoja transportnyh sredstv na ostanovochnyh punktah marshruta gorodskogo passazhirskogo transporta [Patterns of changes in vehicle dead time at stopping points of the urban passenger transport route]. *Vestnik DIAT.* 2008; 3: 15–20 (in Russian).

17. Kaljuzhnyj M.V. Modelirovanie prodolzhitel'nosti prostoja transportnyh sredstv na ostanovochnyh punktah marshruta gorodskogo passazhirskogo transporta [Modeling the duration of dead time of vehicles at stopping points of the route of urban passenger transport]. *Vestnik DIAT.* 2009; 2: 14–18 (in Russian).

18. Zedgenizov A.V. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija ostanovochnyh punktov gorod-skogo passazhirskogo transporta [Improving the functioning of stopping points for urban passenger transport]. *Vestnik IrGTU*, 2008; 3(35):121—123 (in Russian).

19. Zedgenizov A.V. *Ostanovochnye punkty gorodskogo passazhirskogo transporta* [Stopping points for urban passenger transport]: monogr. IrGTU: LAP Lambert Academic Publishing, 2009: 120. (in Russian).

20. Zedgenizov A.V., Levashev A.G., Mikhailov A.Y., Verification of the transit stops capacity model. *Networks for mobility 2008: Proceedings of the 4th International Symposium, Stuttgart, FOVUS*, 2008: 23, 25.

21. Al-Mudhaffar A., Nissan A., Bang K.L. Bus Stop and Bus Terminal Capacity. *Transportation Research Procedia.* 14:1762-1771, 2016: 1762 – 1771.

22. Kazhaev A.A. Imitacionnaja model' zagruzki ostanovochnyh punktov gorodskogo marshrutnogo transporta [A simulation model of the load of stopping points of urban transport route]. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii.* 2011; 1: 86–94 (in Russian).

23. Eliseev M.E., Lipenkov A.V., Maslova O.A. O podhodah k modelirovaniju vremeni prostoja avtobusov na ostanovochnyh punktah gorodskogo passazhirskogo transporta [On approaches to modeling bus downtime at bus stops in urban passenger transport]. *Mir transporta i tehnologicheskih mashin.* 2012; 3: 84-93. (in Russian).

24. Sochnev A.N. *Imitacionnoe modelirovanie dvizhenija marshrutnyh avtobusov* [Simulation of the movement of shuttle buses] *Sovremennye nauchnye issledovanija i innovacii*. 2012; 5. Available at: http://web.snauka.ru/issues/2012/05/12603 (in Russian).

25. Fernandez, R., Modelling public transport stops by microscopic simulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.* 2010; 18(6): 856-868.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фадеев А.И. – Разработка методики расчета пропускной способности остановочных пунктов городского пассажирского транспорта, разработка алгоритма имитационного моделирования остановочного пункта как СМО, анализ полученных расчетов.

Фомин Е.В. – Получение экспериментальных выборок длительности обслуживания заявок и интенсивности их поступления. Участие в проведении расчетов. Обзор литературных источников.

Алхуссейни С. – Анализ состояния вопроса. Обзор литературных источников. Участие в подготовке и анализе исходных данных для расчетов.

AUTHORS CONTRIBUTION

Aleksandr I. Fadeev – Development of a methodology for calculating the throughput capacity of stop points in urban passenger transport, development of an algorithm for simulating a stop point as QS, analysis of the obtained calculations.

Evgeny V. Fomin – Obtaining experimental samples of the duration of service requests and the intensity of their receipt. Participation in the calculations. Review literary sources.

Sami Alhusseini – Analysis the issue status. Review literary sources. Participation in preparation and analysis input data for calculations.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадеев Александр Иванович – канд. техн. наук, доц. кафедры транспорта Сибирского федерального университета, Scopus ID: 57208356151, (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д.26, e-mail: fai@ak1967.ru).

Фомин Евгений Валерьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры транспорта Сибирского федерального университета, Scopus ID: 57212171682, (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д.26, e-mail: 2325337@mail.ru).

Алхуссейни Сами – аспирант кафедры транспорта Сибирского федерального университета «СФУ», ORCID: orcid.org/0000-0003-3028-0675, Scopus ID: 57212171306, Web of Science ID: AAC-6792-2020, (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д.26, e-mail: eng.sami20143@gmail.com).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr I. Fadeev – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of the Department of Transport at Siberian Federal University, Scopus ID: 57208356151, (660074, Krasnoyarsk, Akademika Kirenskogo st., 26. E-mail: e-mail: fai@ak1967.ru).

Evgeny V. Fomin – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of the Department of Transport at Siberian Federal University, Scopus ID: 57212171682, (660074, Krasnoyarsk city, Akademika Kirenskogo st., 26. E-mail:e-mail:2325337@mail.ru).

Sami Alhusseini – Postgraduate student of the Department of Transport at Siberian Federal University, ORCID: 0000-0003-3028-0675, Scopus ID: 57212171306, Web of Science ID: AAC-6792-2020, (660074, Krasnoyarsk city, Akademika Kirenskogo st.,26. E-mail:eng.sami20143@gmail.com).

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal