

УДК 656.072.2

Представлено результати експериментальних досліджень вибору пасажиром одного з наявних альтернативних маршрутів слідування від початкової до кінцевої зупинки або до зупинки пересадки в випадку, коли умови поїздки на різних маршрутах відрізняються. Статистична обробка експериментальних даних показали наявність функціонального взаємозв'язку між ймовірністю вибору маршруту пересування від часу чекання пасажиром транспортного засобу на зупиночно-му пункті

Ключові слова: міський пасажирський транспорт, пасажир, маршрут слідування, альтернативні маршрути, ймовірність, час чекання на зупинці, регресійна модель

Представлены результаты экспериментальных исследований выбора пассажирами одного из наличных альтернативных маршрутов следования от начальной до конечной остановки или до остановки пересадки в случае, когда условия поездки на разных маршрутах различаются. Статистическая обработка экспериментальных данных показала наличие функциональной взаимосвязи между вероятностью выбора маршрута передвижения и временем ожидания пассажиром транспортного средства на остановочном пункте

Ключевые слова: городской пассажирский транспорт, пассажир, маршрут следования, альтернативные маршруты, вероятность, время ожидания на остановке, регрессионная модель

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫБОРА ПАСАЖИРОМ МАРШРУТА СЛЕДОВАНИЯ

Н. А. Нефедов

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра транспортных систем и логистики

Харьковский национальный

автомобильно-дорожный университет

ул. Петровского, 25, г. Харьков, Украина, 61002

E-mail: nkts@meta.ua

Альберт Авуа Дж.

Директор

Консорциум городского развития

104 Квэйм Нкрума авеню, ком. GP 17186, Аккра,

Республика Гана

E-mail: urbanconsortium@yahoo.co.uk

1. Введение

Одной из основных задач совершенствования системы городского пассажирского транспорта является задача определения (или прогнозирования) загрузки маршрутов по перегонам. Существующие подходы к решению данной задачи – детерминированные и стохастические, приводят к решениям, характеризующимся большой погрешностью. Причины погрешности объясняются не только закономерностями статистических методов, но и применяемыми расчетными моделями, которые недостаточно точно описывают поведение пассажиров при выборе маршрута следования. Основным недостатком всех используемых расчетных моделей является статичность предпосылок, на которых они построены, что выражается в неизменности выбора маршрута передвижения (в детерминированных моделях) или вероятностей выбора альтернативных маршрутов передвижения (в вероятностно-статистических моделях). В данной работе выдвинута гипотеза о том, что предпочтения пассажира относительно привлекательности какого-либо из альтернативных маршрутов, которым он может воспользоваться для осуществления поездки, изменяется в зависимости от фактического времени ожидания им транспортного средства на остановке.

2. Постановка проблемы

Любое решение относительно параметров системы городского пассажирского транспорта – количества и трасс маршрутов городского пассажирского транспорта, типа и количества подвижного состава на маршрутах, расписания движения подвижного состава на маршрутах, влечет за собой определенные затраты как со стороны транспортной системы, так и ее пользователей. И каждая из составляющих перечисленных затрат сложным образом зависит от, в конечном итоге, зависит от загрузки каждого из маршрутов на перегонах. Соответственно, проблема совершенствования системы городского пассажирского транспорта в любой постановке требует как можно более точного прогнозирования распределения пассажиропотока по маршрутам.

Известные методы решения данной задачи не учитывают изменения предпочтений пассажиров относительно привлекательности альтернативных маршрутов и, соответственно, выбора конкретного маршрута для осуществления поездки. В данной работе рассматривается вопрос влияния фактического времени ожидания пассажиром транспортного средства на остановке на изменение привлекательности маршрутов для данного конкретного пассажира.

Указанное влияние измеряется вероятностью выбора какого-либо из альтернативных маршрутов, которая является функцией от фактического времени ожидания пассажиром транспортного средства на остановке. Поскольку данное изменение является отражением сугубо субъективных, зависящих исключительно от личностных характеристик пассажира параметров, постольку определение формальных характеристик закономерности такого влияния возможно только путем наблюдения за поведением пассажиров во время ожидания транспортных средств на остановках.

Стороннее наблюдение за поведением пассажиров при выборе маршрута следования теоретически возможно, однако сопряжено с большим количеством организационных и технических дорогостоящих решений. Поэтому наиболее приемлемым способом решения рассматриваемой задачи является анкетирование пассажиров. Основной задачей анкетирования является определение времени принятия пассажиром решения о посадке в транспортное средство какого-либо из альтернативных маршрутов в зависимости от фактического времени нахождения его на остановке.

3. Литературный обзор

Наиболее распространенным методом прогнозирования распределения пассажиропотока по перегонам маршрутов городского пассажирского транспорта является метод, основанный на пропорциональности предоставляемой альтернативными маршрутами провозных возможностей на остановочном пункте [1]. Правомерность такого подхода очевидна при условии дефицита провозных возможностей и отсутствии различий между альтернативными маршрутами. В современных условиях, при наличии конкуренции, в том числе и ценовой, между маршрутами такой подход утратил актуальность.

Другой подход, основанный уже на учете различий между альтернативными маршрутами [2], в частности – по тарифу на проезд, по коэффициенту заполнения салона, по времени поездки, предполагает распределение пассажиропотока пропорционально комплексному показателю – функции привлекательности маршрутов. Преимуществом данного подхода является учет факторов существенно влияющих на выбор пассажиром маршрута передвижения, однако недостатком является детерминированность решений – считается, что пассажир всегда и однозначно выбирает только один маршрут передвижения, тот, у которого для конкретного пассажира наивысшая функция привлекательности.

Более гибким является подход, основанный на модифицированной функции привлекательности пути передвижения пассажира, дополнительно к предыдущему учитывающий количество пересадок, и предполагающий распределение пассажиропотока пропорционально относительной привлекательности альтернативных маршрутов [3].

В подходе, приведенном в работе [4], реализующем модель последовательного гибридного выбора, для определения функции привлекательности пути передвижения предложено учитывать не только параметры маршрутов (явные факторы), но и показатели, характеризующие индивидуальное восприятие пассажиром

параметров маршрутов. Данный подход позволяет повысить точность расчета вероятностей выбора пассажиром пути передвижения, однако широкое варьирование показателей индивидуального восприятия параметров маршрутов не позволяет прогнозировать значения вероятностей выбора пассажиром пути передвижения с погрешностью меньшей 10 %.

Подход, предложенный в работе [5], получивший развитие в работе [6], направлен на учет в оценке привлекательности маршрутов неколичественных параметров маршрута в восприятии пассажира, таких как комфортабельность поездки и ожидаемое время отправления транспортного средства. Недостатком представленной методики является выбор только одного «наилучшего» маршрута из всех возможных.

В работе [7] предложена методика решения обратной задачи – выбор наилучшего места жительства с учетом привязки будущих деловых поездок с использованием существующей маршрутной сети. Преимуществом предложенного подхода является строгая с математической точки зрения оптимизация варианта расположения места жительства, недостатком – то, что в качестве критерия оптимизации выступает либо стоимость поездки, либо ее продолжительность.

Постановка задачи выбора маршрута передвижения, рассмотренная в работах [8, 9], больше соответствует реальностям функционирования городских транспортных систем перевозки пассажиров и учитывает возможность использования пассажиром не одного, а нескольких маршрутов. При этом распределение пассажиропотоков по маршрутам определяется вероятностью выбора пассажиром маршрута передвижения пропорциональной его функции привлекательности. Кроме того, в работе [8] приводится методика определения количества альтернативных маршрутов передвижения при осуществлении поездки с использованием личного автотранспорта.

Автор работы [10] доказывает существенную погрешность метода прогнозирования распределения пассажиропотока по маршрутам городского пассажирского транспорта, основанный на пропорциональности предоставляемой альтернативными маршрутами провозных возможностей на остановочном пункте и обосновывает наличие влияния времени ожидания пассажиром транспортного средства на остановке. Результирующая модель распределения пассажиропотока по маршрутам представляет собой функцию плотности вероятности объема пассажиропотока, скопившегося на остановочном пункте к моменту прибытия транспортного средства одного из множества альтернативных маршрутов. Однако такой вывод справедлив только в том случае, если все прочие характеристики альтернативных маршрутов одинаковы.

Общим недостатком современных методов прогнозирования распределения пассажиропотока по маршрутам является положенное в их основу допущение о неизменности выбора пассажира, который не изменяется до тех пор, пока не изменятся значения факторов, положенных в основу расчетных моделей.

Целью исследования является определение количественных характеристик степени влияния фактического времени ожидания пассажиром транспортного средства на остановочном пункте на вероятность выбора им маршрута передвижения. Для достижения поставлен-

ной цели необходимо решить следующие задачи: определить в существующей схеме маршрутов городского пассажирского транспорта участки сети, на которых услуги по перевозке пассажиров предоставляются на нескольких маршрутах с различными техническими, эксплуатационными и экономическими параметрами; сформировать группу постоянных респондентов, различных по социальному положению, провести анкетирование респондентов в течение интервала времени, необходимого для представительной выборки; методами регрессионного анализа определить существование взаимосвязи между вероятностью выбора пассажиром маршрута передвижения и, в случае существования такой взаимосвязи, определить ее количественные характеристики.

4. Модель вероятности выбора пассажиром маршрута следования

Для решения указанной задачи проведено анкетирование 90 респондентов, распределенных по социальным группам следующим образом: студенты – 50 чел., рабочие – 25 чел., служащие – 15 чел. в возрасте от 20 до 54 лет. У всех респондентов маршрут деловой поездки (на работу или учебу) включал участок от остановки «ул. Познанская» по проспекту 50-летия ВЛКСМ до остановки «станция метро Академика Барабашова». На этом участке пассажиры для передвижения могут воспользоваться одним из трех маршрутов: № 24 (троллейбус), № 38 и № 281 (маршрутное такси). К обработке принимались анкеты, в которых время посадки укладывалось во временной интервал от 7:00 до 9:00. Анкетирование проводилось в период с 1 апреля 2012 года по 31 мая 2012 года. Всего обработано 1468 анкет. Оценка заполнения салонов транспортных средств производилась в те же сроки визуальным (бальным) способом. Результаты экспериментальных значений вероятности выбора пассажиром маршрута передвижения представлены в табл. 1 – 3.

Вероятности выбора маршрута № 24

День недели	Фактическое время ожидания, мин						
	0	1	2	3	4	5	6
Понедельник	0,51562	0,58536	0,61428	0,80000	0,68000	0,66667	1,00000
Вторник	0,52941	0,66667	0,65060	0,58064	0,58333	1,00000	1,00000
Среда	0,59722	0,62821	0,68571	0,72727	0,76923	0,50000	1,00000
Четверг	0,54237	0,60439	0,72368	0,77777	0,82608	0,77777	0,50000
Пятница	0,53226	0,58416	0,64615	0,71052	0,84210	1,00000	0,60000

Вероятности выбора маршрута № 281Э

День недели	Фактическое время ожидания, мин						
	0	1	2	3	4	5	6
Понедельник	0,21875	0,25609	0,21428	0,11428	0,20000	0,25000	0,00000
Вторник	0,27941	0,21794	0,22891	0,22580	0,25000	0,00000	0,00000
Среда	0,29166	0,15384	0,17142	0,12121	0,15384	0,37500	0,00000
Четверг	0,28813	0,26373	0,11842	0,18518	0,04347	0,00000	0,37500
Пятница	0,27419	0,22772	0,21538	0,18421	0,10526	0,00000	0,00000

Вероятности выбора маршрута № 38Э

День недели	Фактическое время ожидания, мин						
	0	1	2	3	4	5	6
Понедельник	0,26562	0,15853	0,17142	0,08571	0,12000	0,08333	0,00000
Вторник	0,19117	0,11538	0,12048	0,19354	0,16667	0,00000	0,00000
Среда	0,11111	0,21794	0,14285	0,15151	0,07692	0,12500	0,00000
Четверг	0,16949	0,13186	0,15789	0,03703	0,13043	0,22222	0,12500
Пятница	0,19354	0,18811	0,13846	0,10526	0,05263	0,00000	0,40000

Одной из основных характеристик альтернативных маршрутов в рассматриваемой постановке задачи является предельная вероятность выбора маршрута передвижения представляет собой вероятность выбора маршрута передвижения m на остановочном пункте j при дефиците провозных возможностей, которая рассчитывается по формуле:

$$P_{mj(np)} = \frac{PM_{mj}}{\sum_{k=1}^M PM_{kj}}, \tag{1}$$

где PM_{kj} – провозные возможности k-го маршрута на j-ом остановочном пункте, пасс.мест/час;

M – множество альтернативных маршрутов, проходящих через j-ый остановочный пункт и способный удовлетворить потребность пассажира в передвижении.

Для рассмотренных в работе альтернативных маршрутов предельные вероятности выбора пассажиром маршрута передвижения на остановке «ул. Познанская» составляют: маршрут № 24 – 0,93,6 пасс.мест/час; маршрут № 281Э – 2,79,3 пасс.мест/час; маршрут № 38Э – 1,10,3 пасс.мест/час. Обработка результатов эксперимента показала, что разница предпочтений при выборе маршрута передвижения между представителями различных социальных групп незначительна. Поэтому данные всех респондентов были объединены в одну выборку.

Для этой выборки определены аппроксимирующие функции изменения вероятности выбора пассажиром маршрута передвижения, которые описываются следующим образом:

Таблица 1

$$P'_{mj(\tau)} = P_{mj(np)} + [P_{mj(0)} + P_{mj(np)}] \cdot 2,863^{|P_{mj(0)} - P_{mj(np)}| \tau}, \tag{2}$$

где $P_{mj(np)}$ – предельная вероятность выбора m-го маршрута на j-ом остановочном пункте;

$P_{mj(0)}$ – вероятность выбора m-го маршрута на j-ом остановочном пункте при времени ожидания пассажиром транспортного средства равным нулю;

τ – фактическое время ожидания пассажиром транспортного средства на остановочном пункте, мин.

Вероятность выбора m-го маршрута на j-ом остановочном пункте при времени ожидания пассажиром транспортного

Таблица 4

средства равным нулю наилучшим образом определяется исходя из следующей зависимости:

$$\xi = \frac{P_{mj(0)}}{(K_{mj} + C)^Q} = \text{const}, \forall m \in M, \quad (3)$$

где K_{mj} – привлекательность m -го маршрута на j -ом остановочном пункте, определенная в соответствии с рекомендациями [4];

C и Q – корректирующие коэффициенты.

Значения корректирующих коэффициентов C и Q определены по результатам тех же экспериментальных исследований методом секущих. Значения коэффициентов, обеспечивающих минимальную сумму квадратов отклонений расчетных значений вероятности выбора пассажиром пути передвижения от экспериментальных, составляют – 10,07 и 1,172 соответственно.

Отрицательное значение коэффициента C указывает на уменьшение степени влияния привлекательности маршрутов в случае наличия транспортного средства на остановочном пункте в момент подхода пассажира к нему. Это подтверждает рабочую гипотезу данного исследования о динамичности предпочтений пассажиров. При этом (2) указывает на асимптотический характер изменения привлекательности маршрутов.

Вероятность выбора пассажиром пути передвижения, определенное по (2), корректируется исходя из условия полной вероятности следующим образом:

$$P_{mj} = \frac{P'_{mj}}{\sum_{i=1}^M P'_{ij}}, \forall m \in M, \quad (3)$$

где P_{mj} – расчетное значение вероятности выбора пассажиром маршрута передвижения.

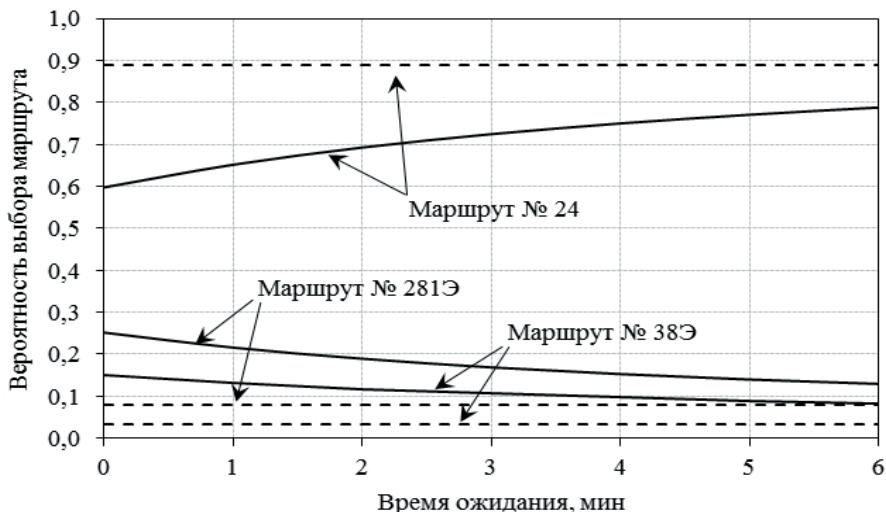
Расчитанные по (2) – (4) предсказанные значения вероятности выбора пассажиром маршрута передвижения для анализируемых маршрутов в зафиксированном во время экспериментальных исследований интервале времени ожидания пассажиром транспортного средства на остановке (\bar{P}_{mdr}) приведены в табл. 4.

Выявленная в результате регрессионного анализа данных экспериментальных исследований закономерность указывает, также, на следующую особенность. Для маршрутов, у которых начальная вероятность больше предельной, с увеличением фактического вре-

Предсказанные значения вероятности выбора пассажиром маршрута передвижения

Маршрут	Фактическое время ожидания пассажиром транспортного средства на остановке, мин						
	0	1	2	3	4	5	6
№ 24	0,54500	0,61996	0,67323	0,71305	0,74399	0,76874	0,78870
№ 281Э	0,27000	0,22511	0,19364	0,17039	0,15263	0,13877	0,12774
№ 38Э	0,18500	0,15491	0,13319	0,11655	0,10333	0,09254	0,08356

мени ожидания пассажиром транспортного средства на остановке их привлекательность, оцениваемая вероятностью выбора пассажиром именно этого маршрута, уменьшается (рис. 1).



— — — предельная вероятность выбора пассажиром маршрута передвижения;
 — — — рассчитанная по (1) вероятность выбора пассажиром маршрута передвижения.

Рис. 1. Изменение вероятности выбора пассажиром маршрута передвижения в зависимости от фактического времени ожидания на остановке

5. Апробация

Модель (2) проверена на адекватность с помощью критерия Фишера.

Для данных, представленных в табл. 5, общая сумма квадратов отклонений экспериментальных значений вероятности выбора пассажиром маршрута передвижения от среднего составляет 8,4989615, а сумма квадратов отклонений предсказанных значений вероятности от экспериментальных – 1,4410044.

Следовательно, можно считать, что модель (2) достаточно точно количественно описывает закономерность влияния фактического времени ожидания пассажиром транспортного средства на остановочном пункте на вероятность выбора пассажиром маршрута передвижения.

Таблица 5

Сумма квадратов отклонений фактических значений вероятности выбора пассажиром маршрута передвижения от среднего ($SS_{общ}$), сумма квадратов отклонений предсказанных значений вероятности выбора пассажиром маршрута передвижения от фактических (SS_p)

Показатель	Маршрут	Фактическое время ожидания пассажиром транспортного средства на остановке, мин						
		0	1	2	3	4	5	6
$SS_{общ}$	№ 24	0,22458	0,39797	0,55400	0,77393	0,87434	1,22531	1,43222
	№ 281Э	0,02331	0,06749	0,11139	0,14872	0,19297	0,34201	0,44618
	№ 38Э	0,12056	0,15304	0,17655	0,25372	0,25900	0,34047	0,38118
SS_p	№ 24	0,04480	0,08218	0,11551	0,14422	0,16865	0,18954	0,20736
	№ 281Э	0,00401	0,01171	0,01953	0,02655	0,03266	0,03784	0,04229
	№ 38Э	0,02200	0,03184	0,04005	0,04697	0,05292	0,05800	0,06237

6. Выводы

В системе маршрутов городского пассажирского транспорта наиболее полно соответствующие цели исследования является участок сети от остановки «ул. Познанская» до остановку «станция метро

Ак. Барабашова», по по которому проходят три маршрута: № 24 (троллейбус), № 38Э (маршрутное такси) и № 281Э (маршрутное такси). От сформированной группы респондентов в составе 90 человек за время проведения обследования с 1 апреля 2012 года по 31 мая 2012 года получено 1468 анкет. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что существует функциональная взаимосвязь между фактическим временем ожидания пассажиром транспортного средства на остановке и вероятностью выбора им одного из альтернативных маршрутов передвижения. Выявленная и формализованная с помощью методов регрессионного анализа количественная характеристика такой взаимосвязи характеризуется нелинейностью и немонотонностью, что указывает на необходимость корректировки существующих методов прогнозирования распределения пассажиропотока между альтернативными маршрутами с учетом фактического времени ожидания пассажиром транспортного средства на остановке.

Литература

1. Доля, В. К. Теоретические основы и методы организации маршрутных автобусных перевозок пассажиров в крупных городах [Текст]: в 2 т.: дис. ...канд. техн. наук 05.22.10 / В. К. Доля // Эксплуатация автомобильного транспорта. – Московский автомобильно-дорожный институт, 1993. – 301 с.
2. Вдовиченко, В. О. Ефективність функціонування міської транспортної системи [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.22.01 / В. О. Вдовиченко // Транспортні системи. – Національний транспортний університет, 2004. – 20 с.
3. Горбачов, П. Ф. Оцінка реакції пасажира на час очікування міського пасажирського транспорту [Текст] / П. Ф. Горбачов, Д. М. Копитков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – Т. 1, № 2 (31). – С. 40–42.
4. Горбачов, П. Ф. Методика определения вида функции привлекательности пути следования в городе [Текст]: сб. научн. тр. / П. Ф. Горбачов // Автомобильный транспорт. – Харьков: ХНАДУ, 2007. – Вып. 20. – С. 122–124.
5. Ben-Akiva, M. Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand (Transportation Studies) [Text] / M. E. Ben-Akiva, S. R. Lerman. – Massachusetts: MIT Press, 1985. – 10 p.
6. Ben-Akiva, M. Discrete choice models with applications to departure time and route choice [Text] / M. E. Ben-Akiva, M. Bierlaire. – Handbook of Transportation Science, 2003. – 32 p.
7. McFadden, D. Modeling the choice of residential location [Text] / D. McFadden. – Amsterdam: University of California, Berkeley and Yale University, 1977. – 34 p.
8. Raveau, S. Sequential and Simultaneous Estimation of Hybrid Discrete Choice Model (Some New Findings) / S. Raveau, R. Alvarez-Daziano, M. Francisca Yanez // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2010. – Vol. 2156. – P. 131–139.
9. Ke, Q. Passenger route choice model and algorithm in the urban rail transit network [Text] / Q. Ke, Z. Peng, Q. Zhi-peng // Journal of Industrial Engineering and Management. – 2013. – Vol. 6 (1). – P. 113–123.
10. Vegano, C. Bus Use Behavior in Multi-Route Corridors [Text] / C. A. Vegano. – Massachusetts Institute of Technology, 2013. – 140 p.