

С.Ю. Гончаренко, П.Ф. Горбачёв, А.В. Россолов

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕСТ ПЕРЕСАДОК ПАССАЖИРОВ НА МАРШРУТНОЙ СЕТИ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА В СРЕДНИХ ГОРОДАХ

Одним из критериев оценки эффективности функционирования городского общественного транспорта является количество пересадок пассажиров при осуществлении передвижений. В средних и больших городах достаточно проблематично выявить фактические места пересадок пассажиров. В статье предлагается новый подход к локализации мест пересадок на маршрутной сети, основанный на анализе данных о пассажирообмене остановочных пунктов. Для построения моделей использован инструментарий математической статистики и теории вероятностей.

Ключевые слова: пассажирская корреспонденция, пассажирообмен, поездка, место пересадки, остановочный пункт, маршрутная сеть.

Постановка проблемы

Основной функцией общественного пассажирского транспорта является оказание услуги по перемещению пассажиров в пространстве с минимальными временными затратами [1]. При этом одной из составляющих процесса передвижения пассажиров является пересадка. При этом места пересадок достаточно сложно локализовать как экспериментальным путем, так и путем моделирования. Существующие модели и подходы к решению данного вопроса не гарантируют высокую точность в определении мест пересадок, что является основанием для проведения исследований в данной области.

Таким образом, объектом исследования является процесс передвижения пассажиров по маршрутной сети средних городов. В качестве предмета исследования рассматривается влияние параметров пассажиропотоков маршрутов на дислокацию мест пересадки на участках маршрутной сети.

Анализ последних исследований и публикаций

В большинстве случаев вопрос определения значения коэффициента пересадочности возникает при нахождении среднего количества поездок, совершаемых одним пассажиром в расчетный период. В этом случае, согласно [2], количество маршрутных поездок определяется по формуле:

$$A_{МПТ(м)} = A_{МПТ(с)} \cdot k_{пер} \quad (1)$$

где $A_{МПТ(м)}$ – количество маршрутных поездок, пасс.;

$A_{МПТ(с)}$ – количество сетевых передвижений, пасс.;

$k_{пер}$ – средний коэффициент пересадочности (по всей сети).

Сетевые передвижения в большинстве случаев определяются синтетическим путем, то есть путем моделирования [3]. В связи с этим выражение (1) видоизменяется и модель коэффициента пересадочности будет следующей [2]:

$$k_{пер} = \frac{\sum_{i=1..r} \sum_{j=1..r} A_{ij} \cdot k_{(пер)ij}}{\sum_{i=1..r} \sum_{j=1..r} A_{ij}}, \quad (2)$$

где A_{ij} – объем передвижений между i -м и j -м транспортными районами, пасс.;

$k_{(пер)ij}$ – количество пересадок в передвижениях между транспортными районами i и j ;

r – количество транспортных районов в модели маршрутной сети города, ед.

При этом основной сложностью исследования рассматриваемого вопроса является определение значений $k_{(пер)ij}$.

В работе [4] на основе выборочного анкетного обследования пассажиров на маршрутной сети г. Хабаровск предложена следующая модель нахождения коэффициента пересадочности:

$$k_{пер} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i \cdot (i+1)}{100}, \quad (3)$$

где m – доля передвижений с i -ми пересадками, %;

i – количество пересадок, ед.;

n – максимальное число пересадок за одно передвижение, ед.

Безусловно, натурные обследования позволяют получить данные с большим уровнем достоверности, чем синтетическим путем, однако, в этом случае возникает необходимость обоснования величины выборки, ее репрезентативности, квотного представления единиц наблюдений в ней и методов ее формирования. В связи с этим ученые делают попытки построить регрессионные модели коэффициента пересадочности, используя в качестве факторных признаков параметры городской территории и характеристики условий передвижения [5]:

$$k_{пер} = \frac{l_n \cdot N_{нас}}{4,77 + 0,000154 \cdot N_{нас}}, \quad (4)$$

где l_n – средняя длина перегона на маршруте, км;

$N_{нас}$ – численность населения города, чел.

Однако в модели (4) не учтены в явном виде вид планировочной структуры города, тип улично-дорожной сети, количество маршрутов и их трассировка по городу и т.д.

Таким образом, целью исследования является формализация процесса локализации мест пересадки и разработка математических моделей индикации процесса пересадки пассажиров при реализации ими передвижений на маршрутной сети в средних городах.

Основной материал статьи

В рамках выборочного обследования корреляций на маршрутной сети возникает необходимость локализации мест пересадок. Фактически при передвижениях пассажиров возможно два варианта пересадки: в первом случае передвижение прерывается и возобновляется на одном и том же остановочном пункте, при втором – пассажир выполняет незначительное пешее перемещение между смежными остановочными пунктами. Основной задачей в описании данного процесса является корректная формализация пересечений некоторых выборочных совокупностей (маршрутов). Таким образом, пусть городской пассажирский маршрут общественного транспорта является множеством R :

$$R_i = \{p_1, p_2, \dots, p_s\}, \quad (5)$$

где s – количество остановок, обслуживаемых i -м маршрутом.

Пересадка пассажира с i -го на $i+1$ маршрут возможна при первом случае, если существует подмножество C , получаемое в результате пересечения, например, двух множеств R_i и R_{i+1} , то есть

$$C = R_i \cap R_{i+1} = \{p\}. \quad (6)$$

При условии:

$$\begin{cases} m(R_i) > m(C), \\ m(R_{i+1}) > m(C), \end{cases} \quad (7)$$

где $m(R_i)$, $m(R_{i+1})$, $m(C)$ – соответственно, мощность множеств R_i , R_{i+1} и C .

На основе (7) существует возможность определить значение пассажиропотока для любого множества R на любом перегоне между остановочными пунктами p_m и p_{m+1} – в прямом направлении, p_m и p_{m-1} – в обратном направлении. Так в прямом направлении он будет определяться:

$$F_{m-(m+1)} = F_{(m-1)-m} + D_m - A_m, \quad (8)$$

где $F_{m-(m+1)}$ – часовой пассажиропоток на маршруте между m -м и $m+1$ остановочными пунктами, пасс.

Для всех перегонов i -го или $i+1$ маршрутов расчет пассажиропотоков выполняется рекуррентным способом. Суммарный пассажиропоток, соответственно, определяется:

$$FG_i = \sum_{m=1}^{s-1} F_{m-(m+1)}, \quad (9)$$

где FG_i – общий часовой пассажиропоток на i -м маршруте, $FG_i \in R_i$, пасс/час.

Известно, что пассажиропотоку на маршруте присущи некоторые колебания, что связано с выполнением пересадок пассажирами и неравномерным распределением мест тяготения по трассе маршрута. Следовательно, на основе результатов выборочных наблюдений существует возможность фиксации резкого увеличения и снижения величин пассажиропотоков по трассам маршрутов. При рассмотрении процедуры пересадки пассажирами между различными маршрутами общественного пассажирского транспорта можно предположить, что резкое увеличение пассажиропотока на каком-либо перегоне может быть вызвано резким его снижением на смежном маршруте.

Для корректной математической формализации процесса пересадки пассажиров между остановочными пунктами смежных маршрутов необходимо задать дополнительные условия:

1. Единство времени, то есть пересадкой является переход пассажиров с одного маршрута на другой за относительно малый промежуток времени (например, в течение одного часа).

2. Единство пространства подразумевает, что пересадка выполняется между остановочными пунктами, которые обслуживают смежные или частично дублирующие друг друга маршруты.

3. Единство направления – рассматриваются пиковый период функционирования общественного пассажирского транспорта, во время которого выполняются, как правило, трудовые передвижения, что обуславливает значительную неравномерность величин пассажиропотоков по направлениям движения. Вследствие этого выполняется допущение,

что резкое уменьшение пассажиропотока на q -м перегоне i -го маршрута приводит к значительному увеличению пассажиропотока на f -м перегоне $i+1$ маршрута.

Для фиксации факта выполнения пересадки введем индикатор события:

$$I_{II}(T_{p_i \rightarrow p_{i+1}}) = \begin{cases} 1, & T_{p_i \rightarrow p_{i+1}} > 0, \\ 0, & T_{p_i \rightarrow p_{i+1}} = 0, \end{cases} \quad (10)$$

где $I_{II}(T_{p_i \rightarrow p_{i+1}})$ – индикаторная функция выполнения перехода пассажиропотока с одного маршрута на другой;

$T_{p_i \rightarrow p_{i+1}}$ – величина пассажиропотока, выполняющего переход с i -го на $i+1$ маршрут, пасс./час.

Выражение (8) при осуществлении пересадки на m -м остановочном пункте будет иметь модифицированный вид, что связано с физическими процессами формирования величин D_m и A_m . Для простоты отображения данного процесса обозначим индексами m и n остановочные пункты двух различных маршрутов. В результате получаем, что:

$$D_m = T_{n \rightarrow m} + D'_m, \quad (11)$$

где $T_{n \rightarrow m}$ – количество пассажиров, которые, прибыв на n -й остановочный пункт $i+1$ маршрута, выполнили пересадку на m -ю остановку i -го маршрута, пасс.;

D'_m – количество пассажиров, которые начинают свое передвижение на m -ом остановочном пункте i -го маршрута, пасс.

Очевидно, что в точках пересадки между пассажирообменами взаимодействующих маршрутов существует взаимосвязь, которая аналитически обосновывается следующими выражениями:

$$A_n = T_{n \rightarrow m} + A'_n, \quad (12)$$

$$A_m = T_{m \rightarrow n} + A'_m, \quad (13)$$

$$D_n = T_{m \rightarrow n} + D'_n, \quad (14)$$

где A'_n – количество пассажиров, которые заканчивают свое передвижение пешком, выйдя на n -м остановочном пункте $i+1$ маршрута, пасс.;

$T_{m \rightarrow n}$ – количество пассажиров, которые, прибыв на m -й остановочный пункт i -го маршрута, выполнили пересадку на n -ю остановку $i+1$ маршрута, пасс.;

A'_m – количество пассажиров, которые заканчивают свое передвижение пешком, выйдя на m -м остановочном пункте i -го маршрута, пасс.;

D'_n – количество пассажиров, которые начинают свое передвижение на n -ом остановочном пункте $i+1$ маршрута, пасс.

Поток пассажиров подходящих к остановочному пункту является простейшим, то есть Пуассоновским, так как время подхода отдельно взятого пассажира не зависит от времени подхода других пассажиров [6].

Описанные выше свойства Пуассоновского потока довольно хорошо адаптируются потоку пассажиров, подходящих к остановочному пункту. Таким образом, вероятность подхода на остановочный пункт k -ого количества пассажиров будет определяться:

$$P_k = \frac{a^k}{k!} \cdot e^{-a}, \quad (15)$$

где a – параметр распределения (соответствует математическому ожиданию и дисперсии), пасс.;

k – количество пассажиров, подошедших на остановочный пункт за период t , пасс.

Длительность расчетного периода может быть различной: от одного часа до всего периода «пик». На первом этапе построения математической модели примем в качестве расчетного периода один час. Таким образом, за расчетный период количество пассажиров, подходящих на m -й остановочный пункт будет составлять k_m . Следовательно, для маршрута можно определить некоторую среднюю величину интенсивности подхода пассажиров к остановочным пунктам:

$$\bar{k}_i = \frac{\sum_{m=1}^{s_i-1} k_m}{s_i}, \quad (16)$$

где \bar{k}_i – средняя интенсивность подхода пассажиров на остановочные пункты в одном из направлений i -го маршрута, пасс./час;

s_i – количество остановочных пунктов i -го маршрута, ед.

Для определения точек пересадки на маршрутной сети города сделаем предположение, что возможно выполнение передвижения без пересадки. То есть выдвинем гипотезу о том, что с вероятностью $P = 0,95$ все передвижения на рассматриваемом маршруте будут выполняться без пересадок и количество пассажиров, подошедших на каждый остановочный пункт будет меньше либо равно некоторому значению k_p . Тогда с учетом (15) выдвинутую гипотезу можно записать как:

$$\sum_{k=0}^{k_p} P_k \cong P = 0,95. \quad (17)$$

Следовательно, выдвинутая гипотеза будет опровергнута (пересадка состоится), если $k > k_p$, что возможно с вероятностью $1 - P = 0,05$.

Основным свойством закона Пуассона является его преобразование в нормальный при $k > 10$ [6]. В

средних и больших городах поток пассажиров, подходящих на остановочные пункты за один час в пиковый период может превышать данное значение. Значит в этом случае вероятность подхода на остановочный пункт k -го количества пассажиров будет определяться по нормальному закону с параметрами $(\bar{k}; \sqrt{\bar{k}})$. Так вероятность, что за расчетный период на остановочный пункт подойдет k пассажиров (больше 10) будет определяться:

$$f(k) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \bar{k}}} \cdot \int_1^k e^{-\frac{(k-\bar{k})^2}{2 \cdot \bar{k}}} . \quad (18)$$

Квантиль вероятности x_α согласно [7] при выбранном уровне доверительной вероятности равен 1,64. С учетом этого конечный вид доверительного интервала будет следующим: $(\bar{k} - 1,64 \cdot \sqrt{\bar{k}}; \bar{k} + 1,64 \cdot \sqrt{\bar{k}})$. Следовательно, рассматриваемая гипотеза будет опровергнута, если выполнится условие $k_i > \bar{k} + 1,64 \cdot \sqrt{\bar{k}}$. При этом вероятность наступления данного события будет равна

$$P(k_i > \bar{k} + 1,64 \cdot \sqrt{\bar{k}}) = \frac{1-\alpha}{2} = 0,025 . \quad (19)$$

Несмотря на то, что вероятность наступления данного события относительно мала, в некоторых случаях этого будет достаточно для индикации процесса пересадки. Описанный выше подход будет применим для точек пересечения магистралей, то есть при наличии $S = R_i \cap R_{i+1} = \{p\}$. На рис. 1 приведены ориентировочные значения правой границы доверительного интервала, превышение которой будет индикатором события выполнения пересадки.

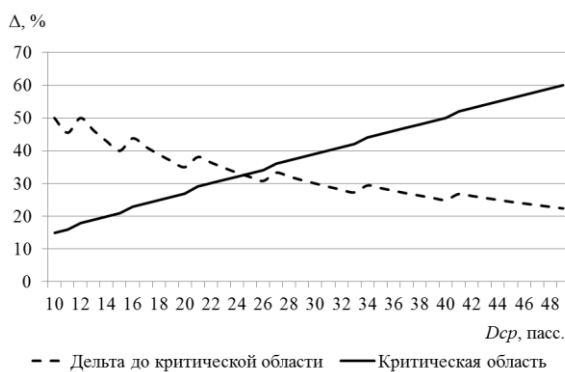


Рис. 1 График изменения правой границы критической области

Анализируя данные, представленные на рис. 1, можно сделать вывод, что увеличение среднего значения емкости по отправлению (в одном направлении) приводит к снижению процента увеличения критической границы. Таким образом, очевидно, что при заданном уровне доверительной

вероятности с увеличением среднего количества отправляющихся пассажиров с остановочных пунктов возрастает вероятность принятия ложного решения о выполнении пересадки. Одними из ключевых факторов в этом случае будут количество остановочных пунктов и их емкости по отправлению.

Несмотря на то, что вероятность критического уровня определяется по (19), необходимый уровень доверительной вероятности α нам пока еще неизвестен, так как его значение будет предопределять наличие ошибки в фиксации процесса пересадки пассажиров. Согласно теории вероятностей среднее число испытаний до первого ложного вывода будет определяться:

$$n_{ucn} = \frac{1}{\varepsilon} , \quad (20)$$

где ε – уровень ошибки, $\varepsilon = \frac{1-\alpha}{2}$.

Следует отметить, что среднее количество испытаний до ложного вывода будет соответствовать и среднеквадратическому отклонению, а сами «испытания» фактически являются номерами остановочных пунктов. В этом случае необходимо определить такой уровень ошибки, при котором будет выполняться условие:

$$(1-\varepsilon)^{n_{ucn}} \geq 1-\delta , \quad (21)$$

где δ – вероятность ошибки в выводе о пересадке на хотя бы одном остановочном пункте.

Исходя из этого, вероятность отсутствия ошибки при анализе всех остановочных пунктов будет определяться:

$$(1-\varepsilon)^{n_{ucn}} = 1-\delta . \quad (22)$$

Выполнив элементарные преобразования, получаем:

$$\varepsilon = 1 - \sqrt[n_{ucn}]{1-\delta} = 1 - (1-\delta)^{\frac{1}{n_{ucn}}} . \quad (23)$$

Если брать во внимание условие, δ должно быть предельно малым числом ($\delta \rightarrow 0$), что будет гарантировать высокую точность выводов о выполнении пересадки получим из (19)

$$\varepsilon = 1 - (1-\delta)^{\frac{1}{n_{ucn}}} \cong \frac{\delta}{n_{ucn}} . \quad (24)$$

Данная эквивалентность получена исходя из 2-го замечательного предела:

$$(1+x)^m - 1 \approx m \cdot x , \text{ при } x \rightarrow 0 . \quad (25)$$

Таким образом, зависимость (24) позволяет определить квантиль вероятности для нахождения правой границы доверительного интервала. Используя найденный показатель, можно проверить гипотезу о выполнении пересадок на участках маршрутной сети, где присутствует пересечение трасс различных маршрутов.

Выводы

Предложенная методика определения мест пересадки пассажиров при передвижении по маршрутной сети основана на инструментарии статистического анализа и теории вероятностей. Идентификация мест пересадки на основе разработанных моделей гарантируют высокую достоверность и позволяют, отталкиваясь лишь от данных о пассажирообмене остановочных пунктов, формализовать места пересадки на маршрутной сети города.

Литература

1. Спиринов И. В. *Перевозки пассажиров городским транспортом: Справочное пособие [Текст] / И. В. Спиринов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 413 с.*
2. Ефремов В. С. *Теория городских пассажирских перевозок: учеб. пособие для вузов [Текст] / В. С. Ефремов, В. М. Кобозев, В. А. Юдин. – М.: Высшая школа, 1980. – 535 с.*
3. Заблоцкий Г. А. *Методы расчета потоков пассажиров и транспорта в городах [Текст] / Г. А. Заблоцкий ; под ред. А. К. Старинкевич. – М.: ЦНТИ по гражд. строит. и архит., 1968. – 92 с.*
4. Володькин П. П. *Оптимизация транспортного обслуживания населения муниципальных образований с учетом социальных факторов [Текст]: автореф. дис. ... докт.*

техн. наук: 05.22.10; защищена 07.10.11 / П. П. Володькин; Волгогр. гос. техн. ун-в. – В., 2011. – 42 с.

5. Худяков В. *Исследование оценки качества обслуживания пассажиров городским транспортом в Риге до 2018 года [Текст] / В. Худяков // RESEARCH and TECHNOLOGY – STEP into the FUTURE. – 2007. – Vol. 2. – №2. – P. 5 – 14.*

6. Венецкий И. Г. *Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / И. Г. Венецкий, Г. С. Кильдишев – М.: Статистика, 1975. – 264 с.*

7. Вентцель Е. С. *Теория вероятностей и ее инженерные приложения [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Наука, 1988. – 480 с.*

Рецензент: д-р техн. наук, доц. В.С. Наумов, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Автор: ГОРБАЧЁВ Пётр Фёдорович
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, доктор технических наук, профессор.

Автор: РОССОЛОВ Олександр Вікторович
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, кандидат технічних наук, доцент

Автор: ГОНЧАРЕНКО Сергій Юрійович
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, аспірант.

МОДЕЛЮВАННЯ МІСЦЬ ПЕРЕСАДОК ПАСАЖИРІВ НА МАРШРУТНІЙ МЕРЕЖІ СУСПІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ В СЕРЕДНІХ МІСТАХ

С.Ю. Гончаренко, П.Ф. Горбачёв, А.В. Россолов

Одним з критеріїв оцінки ефективності функціонування міського суспільного транспорту є кількість пересадок пасажирів при виконанні пересування. С середніх та великих містах достатньо проблематично виявити фактичні міста пересадок пасажирів. В статті пропонується новий підхід до локалізації міст пересадок на маршрутній мережі, оснований на аналізі даних про пасажирообмін зупиночних пунктів. Для побудови моделей використано інструментарій математичної статистики та теорії ймовірностей.

Ключові слова: пасажирська кореспонденція, пасажирообмін, поїздка, місто пересадки, зупиночний пункт, маршрутна мережа.

MODELLING OF POINTS OF PASSENGERS TRANSFER ON PASSENGER ROUTE NETWORK IN MIDDLE CITIES

S.J. Goncharenko, P.P. Gorbachev, A.V. Rossolov

The definition of passenger transfer points on route network of public transport is very important because the number of passenger transfers influence on general trip time. It is very difficult to trace the route of passenger trip in middle and big cities. That is why if passenger makes the transfer during his trip mostly it can't be detected. And taking into account the general volume of every day trips it is very difficult to trace every passenger movement. In such conditions the authors of the article are proposing to solve this problem by modeling the points on network route where the passengers make their transfers. The proposed model is based on stochastic approach and with defined possibility predicts the points of transfers. As the main parameters are chosen the number of passenger that departure and arrive on bus stops.

Key words: passenger trip, the point of transfer, bus stop, route network, departure capacity, arrive capacity