

УДК 656.081

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ

Доля К.В., Бугаев И.С.

Харьковский национальный университет городского хозяйства
имени А.Н. Бекетова

Исследован процесс предоставления услуг с перевозки пассажиров на маршрутах общего пользования. Получены данные фактических корреспонденций пассажиров. Проведено исследование возможности применения известных научных подходов относительно расчета пассажирских транспортных корреспонденций. Проведен анализ адекватности полученных результатов. По результатам проведенной работы найдены параметры составляющих, при которых применение рассмотренных методов является возможным в рамках исследуемой системы.

Ключевые слова: корреспонденция, пассажир, система, транспорт, гравитационная модель.

Введение. Современные транспортные системы требуют взвешенных решений относительно их развития, изменений и адаптации к требованиям среды функционирования этих систем. Среда функционирования транспортных систем является техногенной, искусственно созданная для удовлетворения потребностей человечества по перевозке пассажиров или грузов. Для достижения системой состояния, при котором она имеет возможность удовлетворить потребности по перевозкам, необходимо взвешенно принимать решение относительно изменений элементов самой транспортной системы.

Так, в последнее время, получили развитие интеллектуальные транспортные системы. В основном, они нашли свое место в организации дорожного движения. Ярким примером влияния изменений состояния среды на транспортную систему можно считать замену статических средств регулирования дорожного движения на активные, которые меняются по рекомендации интеллектуальных транспортных систем согласно изменений во времени основных характеристик движения транспортных средств в дорожной сети. На существующих примерах можно утверждать, что введение в организацию движения интеллектуальных транспортных систем в городах является затратным и длительным процессом.

В вопросе организации пассажирских перевозок пассажир представляет собой основу всех расчетов. Известно, что от объемов и характеристик перевозок пассажиров зависит расписание движения, количество и тип транспортных средств, схемы движения транспортных средств. Для перевозчика объемы перевозок обуславливающих денежные потоки предприятия. Важность установления объемов перевозок для пассажирской транспортной системы является значительной.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Авторами работ [1, 2] предложено проведение исследования товарных потоков (CFS), которое проводится с целью анализа характеристик товарных потоков и сбора статистических данных для движения товаров в странах. В Корее CFS проводится один раз в пять лет с 1998 года. Информация о грузоперевозках собранная с помощью этого исследования в основном используется для оценки спроса на грузоперевозки, а также их статистических данных. Не смотря на то, что спрос на грузовой транспорт сосредоточен на

товарном потоке, представлены преобразования товарного потока к эквивалентному количеству грузовых автомобилей и установления движения для поездки на грузовом автомобиле. Выражение (1) показывает простой метод учета для выборочных данных принимая во внимание отклонения. Здесь, региональный поток товаров оценивается для производства, оптовой торговли, сельского хозяйства, лесного хозяйства, рыболовства, животноводства и горнодобывающей промышленности, товаров с упором на логистику поставок и за исключением вспомогательных товаров.

$$W_{t_h} = \frac{N_h \cdot N_h^0}{n_h}, \quad (1)$$

где: W_{t_h} – значимость для товаров в регионе h ;
 N_h – количество резидентов в регионе h ;
 N_h^0 – количество нерезидентов в регионе h ;
 n_h – число заключительных товаров в регионе h .

Далее предложено $O-D$ матрицу между регионами по видам товара. Гравитационная модель традиционно используется для оценки товаров при распределении грузов. Общая формулировка модели гравитации показана в выражении (2).

$$X_{ij} = AO_i D_j f(c_{ij}^{-1}), \quad (2)$$

где: X_{ij} – грузовой поток между регионами i и j ;

O_i – образование грузов в регионе i ;
 D_j – привлекательность грузов в регионе j ;
 $f(c_{ij}^{-1})$ – функция тяготения между узлами.

В этом случае $A = const$.

В результатах регрессионного анализа, функция мощность для всех типов грузовых автомобилей была выбрана в качестве функциональной формы с самой высокой степенью согласия по типу товара. Функциональная форма показана в выражении (3).

$$y^m_{ijk} = a l^{\beta}_{ij}, \quad (3)$$

где: y^m_{ijk} – загруженность k типа грузовик между i и j (т);

l_{ij} – общая длина маршрута между начальным регионом i и конечным регионом j в одну сторону;

i, j – зоны движения (1,...251);

m – группа товаров (1,...7);

k – тип грузовика (легкий, средний, тяжелый);

a, β – коррелирующие параметры.

Выражение (2) преобразует загруженность грузовиков, которые в (1) оцениваются как число поездок грузовиков по типу грузовика, с использованием уравнения (4). Загруженность грузовика

преобразуется в общее число поездок грузовика с использованием средней загруженности (т/поездка), соотношения загруженности поездки (загруженность поездки / общее число поездок) по типу грузовика. Оба значения A_{ijk} и LR_{ijk} в Уравнение (4) вычисляются с использованием результатов обзора.

$$T_{ijk} = \frac{\sum y_{ijk}^m}{A_{ijk} \cdot R_{ijk}}, \quad (4)$$

T_{ijk} – общее количество грузоперевозок k типа грузовика между i и j (поездки);

A_{ijk} – средняя загруженность k типа грузовика между i и j (т);

LR_{ijk} – соотношение загруженности поездки k типа грузовика между i и j .

Авторами работ [3-5] описана нелинейная регрессивная модель для прогнозирования пассажирского потока между различными географическими пунктами (городами). Неизвестные параметры оцениваются с использованием агрегированных данных, когда предоставляется только информация о количестве пассажиров каждого города. Как эффективный критерий оценки используется взвешенная сумма остаточных площадей.

$$C_{nij} = a_t t_{nij} + a_c C_{z\ ii}, \quad (5)$$

где: $H_{vi,j}$ – количество отправок из транспортного района i в район j за расчетный период времени;

$a^{Hvi}, P_{общи}^{Hvi} = (P_{общи\ 1}^{Hvi} P_{общи\ 2}^{Hvi} \dots P_{общи\ m}^{Hvi})^T$ и $\gamma_c^{Hvi} = (\gamma_{c\ 1}^{Hvi} \gamma_{c\ 2}^{Hvi} \dots \gamma_{c\ m}^{Hvi})^T$ – неизвестные параметры регрессии;

$P_{общи}$ – общая подвижность населения;

γ_c – коэффициент среднестатистического использования вместимости салона;

$\theta = 1, \tau = 2$ – являются неизвестными параметрами модели;

$c_{(i)} = (c_{i,j} \dots c_{i,m})$ и $g_{(l,l)} = (c_{i,1} c_{j,1} \dots c_{i,m} c_{j,m})$ – m массивы данных;

$\{V_{ij}\}$ – являются независимыми и одинаково распределенными случайными величинами с средним нулевым и неизвестной дисперсией σ^2 ;

$l_{i,j}$ – расстояние между городами i и j ;

H_{mi}, H_{mj} – количество жителей в районах i и j соответственно.

Как следствие этой модели, полученно следующее представление для числа отправленных пассажиров из точки района i .

$$E(H_{vi,i})^* = \sum_{j=1}^n E(H_{vi,j})^* = \sum_{i \neq j} \frac{(H_{mi} H_{mj})^{\theta^*}}{(l_{i,j})^{\tau^*}} \exp(\hat{a}^* + (c_{(i)} + c_{(j)}) P_{общи}^* + g_{(i,j)} \gamma_c^*), \quad (6)$$

Предположено, что $\{V_{ij}\}$ имеет нормальное распределение. Тогда Z_{ij} равняется $\exp(V_{ij})$ и имеет логнормальное распределение.

$$E(Z_{i,j}) = E(\exp(V_{i,j})) = \exp\left(\frac{1}{2} \sigma^2\right), \quad (7)$$

$$D(Z_{i,j}) = D(\exp(V_{i,j})) = \exp(\sigma^2) (\exp(\sigma^2) - 1), \quad (8)$$

Далее для $i \neq j$.

$$E(H_{vi,j}) = \frac{(H_{mi} H_{mj})^{\theta}}{(l_{i,j})^{\tau}} \exp(a + (c_{(i)} + c_{(j)}) P_{общи} + g_{(i,j)} \gamma_c + V_{i,j}) \exp\left(\frac{1}{2} \sigma^2\right), \quad (9)$$

$$D(H_{vi,j}) = \frac{(H_{mi} H_{mj})^{2\theta}}{(l_{i,j})^{2\tau}} \exp(2(a + (c_{(i)} + c_{(j)}) P_{общи} + g_{(i,j)} \gamma_c + V_{i,j})) \exp(\sigma^2) (\exp(\sigma^2) - 1) = (\exp(\sigma^2) - 1) (E(H_{vi,j}))^2$$

Аналогичные формулы имеют места для $\{H_{vi}\}$:

$$E(H_{vi}) = \sum_{j=1}^n E(H_{vi,j}) = \exp\left(\frac{1}{2} \sigma^2\right) \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \frac{(H_{mi} H_{mj})^{\theta}}{(l_{i,j})^{\tau}} \exp(a + (c_{(i)} + c_{(j)}) P_{общи} + g_{(i,j)} \gamma_c), \quad (11)$$

$$D(H_{vi}) = (\exp(\sigma^2) - 1) \sum_{j \neq i} (E(H_{vi,j}))^2. \quad (12)$$

Введением параметра \tilde{a} равного $(a + \sigma^2/2)$ получено выражение (13) в следующем виде:

$$E(H_{vi}) = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \frac{(H_{mi} H_{mj})^{\theta}}{(l_{i,j})^{\tau}} \exp(\tilde{a} + (c_{(i)} + c_{(j)}) P_{общи} + g_{(i,j)} \gamma_c), \quad (13)$$

В качестве критерия эффективности оценки использовано взвешенные наименьшие квадраты суммы:

$$R(\gamma, w) = \sum_{i=1}^n w_i (H_{vi} - E(H_{vi}))^2, \quad (14)$$

где: $\gamma = (\theta \tau \tilde{a} P_{общи}^T \gamma_c^T)^T$ и $w = (w_1 w_2 \dots w_n)^T$ – факторы значимости.

Для минимизации (13) введено градиентный метод. Предположено следующие:

$$\nabla R(\gamma, w) = \left(\frac{\partial}{\partial \theta} R \frac{\partial}{\partial \tau} R \frac{\partial}{\partial \tilde{a}} R \frac{\partial}{\partial P_{общи}} R \frac{\partial}{\partial \gamma_c} R \right)^T, \quad (15)$$

где: R – пара, которая моделирует трудность сообщения между городами.

Учтено, что если w не зависит от параметров, то:

$$\nabla R = \begin{pmatrix} \theta \\ \tau \\ P_{общи} \\ \gamma_c \end{pmatrix}, w = 2 \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n w_i (H_{vi} - E(H_{vi})) \sum_{j=1}^n \ln(H_{mi} H_{mj}) \frac{(H_{mi} H_{mj})^{\theta}}{l_{i,j}^{\tau}} \exp(f_{(i,j)}) \\ \sum_{i=1}^n w_i (H_{vi} - E(H_{vi})) \sum_{j=1}^n \ln(l_{i,j}) \frac{(H_{mi} H_{mj})^{\theta}}{l_{i,j}^{\tau}} \exp(f_{(i,j)}) \\ \sum_{i=1}^n w_i (H_{vi} - E(H_{vi})) \sum_{j=1}^n \frac{(H_{mi} H_{mj})^{\theta}}{l_{i,j}^{\tau}} \exp(f_{(i,j)}) \\ \sum_{i=1}^n w_i (H_{vi} - E(H_{vi})) \sum_{j=1}^n \frac{(H_{mi} H_{mj})^{\theta}}{l_{i,j}^{\tau}} \exp(f_{(i,j)}) g_{(i,j)} \gamma_c^T \end{pmatrix}, \quad (16)$$

где: $f_{(i,j)} = (c_{(i)} + c_{(j)}) P_{общи} + g_{(i,j)} \gamma_c$.

В этом случае ($w = const$), градиентный метод быстро дает оценки неизвестных параметров $\theta^* \tau^* \tilde{a}^* P_{общи}^* \gamma_c^*$. В другом случае, зависимости содержат неизвестные параметры. Поэтому мы должны использовать итеративную процедуру и последовательно пересчитать зависимости и параметров.

Согласно (12) и (15) получено оценку при $i \neq 1$.

$$E(H_{vi,j})^* = \frac{(H_{mi} H_{mj})^{\theta^*}}{(l_{i,j})^{\tau^*}} \exp(\hat{a}^* + (c_{(i)} + c_{(j)}) P_{общи}^* + g_{(i,j)} \gamma_c^*), \quad (17)$$

$$E(H_{vi,i})^* = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n E(H_{vi,j})^* = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \frac{(H_{mi} H_{mj})^{\theta^*}}{(l_{i,j})^{\tau^*}} \exp(\hat{a}^* + (c_{(i)} + c_{(j)}) P_{общи}^* + g_{(i,j)} \gamma_c^*), \quad (18)$$

Аналогично получено:

$$D(H_{bi})^* = (\exp(\sigma^{2*}) - 1) \sum_{j=1}^n (E(H_{bi,j})^*)^2, \quad (19)$$

Также мы можем оценить дисперсию H_{bi} относительно определения дисперсии:

$$D(H_{bi}) = E(H_{bi} - E(H_{bi}))^2, \quad (20)$$

Альтернативно оцениванию $E(H_{bi})$ используя $E(H_{bi})^*$ оцененно $D(H_{bi})$ используя:

$$D(H_{bi})^{**} = (H_{bi} E(H_{bi})^{*2}), \quad (21)$$

Здесь предположено слабую зависимость между H_{bi} и $E(H_{bi})^*$, поскольку последний рассчитывается на основе многих значений $\{H_{bi}\}$.

Авторами работ [6-12] рассмотрены межгосударственные модели предпочтения годовых перелетов из области в область

$$H_{ij} = H_{oi} \frac{H_{nj} F_{mij} F_{ij}}{\sum_j H_{nj} F_{mij} F_{ij}} \quad (22)$$

где: H_{ij} – количество поездок из района i в район j ;

H_{oi} – количество отправлений из транспортного района i за расчетный период времени;

H_{nj} – количество прибытий в транспортный район j за расчетный период времени;

F_{tij} – фактор сопротивления поездке;

F_{ij} – фактор социально-экономической адаптации для обмена между ij .

$$P_{ij}^m = \frac{e^{k_{ij} \log(e^{\frac{1}{f_{ij}^m}})}}{\sum_{m=1}^{all\ mode} k_{ij} \log(e^{\frac{1}{f_{ij}^m}})}, \quad (23)$$

где: P_{ij}^m – вероятность начала передвижения в районе i и окончания в районе j для режима m ;

k_{ij} – коэффициент калибрующий количество отправлений и прибытий из района i с количеством прибытий в район j ;

$f_{n\ ij}^m$ – функция полезности для поездки между областями i и j для режима m .

$$C_{nij} = a_t t_{n\ ij} + a_c C_{s\ ij}, \quad (24)$$

где: C_{nij} – потребительская стоимость поездки между областями i и j ;

$t_{n\ ij}$ – затраты времени одним пассажиром для поездки между районами i и j ;

$C_{s\ ij}$ – затраты на поездку из района i в район j ;

a_t, a_c – калибровочные коэффициенты.

Цель и задачи исследования. Цель работы заключается в моделировании транспортных междугородных пассажирских корреспонденций H_{ij} путем адекватной формализации функции притяжения.

Для достижения поставленной в работе цели предполагается решить следующие задачи:

экспериментально установить пассажирские транспортные корреспонденции между городами с разным количеством жителей;

провести предварительные теоретические расчеты между городами при различных вариантах комбинации функции тяготения;

провести сравнение полученных теоретических и экспериментальных массивов H_{ij} с целью установления адекватной функции притяжения d_{ij} .

Материалы и методы исследования. В настоящее время можно выделить автоматизированные и не автоматизированные методы исследования пассажиропотоков. В не автоматизированных можно отнести следующие методы: табличный,

талонный, таблично-опросный и визуальный. Не автоматизированные методы исследования пассажиропотоков требуют привлечения учетчиков в количестве, равном количеству транспортных средств или остановочных пунктов.

Результаты исследований показателей пассажиропотоков между городами. Расчет предполагает наличие сведений относительно узлов и дуг модели транспортной сети, которая обеспечивает процесс перевозки пассажиров по территории Украины. В качестве узлов было принято города – областные центры и присвоили им соответствующие порядковые номера, а длина дуг – соответственно расстояние между выбранными городами.

В качестве зависимости для расчета корреспонденции пассажиров между городами от пункта i в пункт j была выбрана [13] улучшенная зависимость (48). Для упрощения проведения исследований зависимость предложено рассмотреть в следующем виде:

$$H_{ij} = \frac{H_{bi} H_{nj} k_j d_{ij}}{\sum_{i=1}^n (H_{ni} k_i d_{ij})}, \quad (28)$$

где: H_{ij} – потенциальная корреспонденция между городами i и j , соответственно;

H_{bi} – количество отправлений из пункта i ;

H_{nj} – количество прибытия в пункт j ;

d_{ij} – функция тяготения корреспонденции от пункта i в пункт j ;

k_i и k_j – балансировочные коэффициенты.

В данном случае предлагается функцию притяжения корреспонденции между городами считать по следующей зависимости:

$$d_{ij} = \frac{a}{L_{ij}^x}, \quad (29)$$

где: a – эмпирическая константа;

L_{ij} – расстояние между городами i и j ;

x – калибровочный коэффициент.

С учетом зависимости (59) уравнение (58) приобретает следующий вид:

$$H_{ij} = \frac{H_{bi} H_{nj} k_j \frac{1}{L_{ij}^x}}{\sum_{i=1}^n (H_{ni} k_i \frac{1}{L_{ij}^x})}, \quad (30)$$

где: H_{ij} – потенциальная корреспонденция между городами i и j , соответственно;

H_{bi} – количество отправлений из пункта i ;

H_{nj} – количество прибытия в пункт j ;

t – функция доверительной вероятности тяготения корреспонденции от пункта i в пункт j ;

x – калибровочный коэффициент;

k_i и k_j – балансировочные коэффициенты.

Избранный подход соответствует избранным предыдущими исследователями в частях учета расстояния между городами. В качестве основного фактора влияния на функцию притяжения корреспонденции от пункта i в пункт j и обеспечивает наличие эмпирической константы, которая может нести в себе влияние других факторов среды или элементов самой транспортной системы.

Выводы. Моделирование транспортных междугородных пассажирских корреспонденций H_{ij} путем адекватной формализации функции тяготения позволило получить функцию притяжения для H_{ij} , что предоставило возможность в моделировании транспортных междугородных пассажирских корреспонденций H_{ij} .

Список літератури:

1. Park M. & Hahn J. (2015). Regional Freight Demand Estimation Using Korean Commodity Flow Survey Data. *Transportation Research Procedia*, 11, 504-514.
2. Andronov A. & Santalova D. (2009). On Nonlinear Regression Model for Correspondence Matrix of Transport Network. In *Selected papers of the International Conference Applied Stochastic Models and Data Analysis* (pp. 90-94).
3. Baik H., Trani A., Hinze N., Swingle H., Ashiabor S. & Seshadri A. (2008). Forecasting model for air taxi, commercial airline, and automobile demand in the United States. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2052), 9-20.
4. Wu C., Han J., Hayashi Y. Airport attractiveness analysis through a gravity model: A case study of Chubu International Airport in Japan // *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies The 9th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2011. – Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2011. – С. 419-419.
5. Vrtic M., Fröhlich P., Schüssler N., Axhausen K. W., Lohse D., Schiller C. & Teichert H. (2007). Two-dimensionally constrained disaggregate trip generation, distribution and mode choice model: Theory and application for a Swiss national model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(9), 857-873.
6. Rwakarehe E. E., Zhong M. & Christie J. (2014). Development of a Freight Demand Model for the Province of Alberta Using Public Sources of Data / Rwakarehe E. E., Zhong M. & Christie J. // *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, T. 138. – С. 695-705.
7. Fornalchuk Y., Bilous A. & Demchuk I. The Model of Correspondence of Passenger Transportation on the Basis of Fuzzy Logic / Fornalchuk Y., Bilous A. & Demchuk I. // *ECONTECHMOD: an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes*. – 2015. – № 4.
8. Grosche T., Rothlauf F., Heinzl A. Gravity models for airline passenger volume estimation / Grosche T., Rothlauf F., Heinzl A. // *Journal of Air Transport Management*. – 2007. – № 13. – С. 175-183.
9. Kalaanidhi S., Gunasekaran K. Estimation of Bus Transport Ridership Accounting Accessibility / Kalaanidhi S., Gunasekaran K. // *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. – 2013. – Т. 104. – С. 885-893.
10. Terekhov I. & Gollnick V. (2015). A concept of forecasting origin-destination air passenger demand between global city pairs using future socio-economic scenarios. In *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting* (p. 1640).
11. Xiao-qiang L., Lei W. The Passenger Demand Prediction for Airport Line of Rail Traffic / L. Xiao-qiang, W. Lei // *Metallurgical & Mining Industry*. – 2015. – С. 9.
12. Galkin A. Distribution Channels Management in Different Regions // *Management*. – 2015. – Т. 1. – №. 2. – С. 92-96.
13. Dolya C. (2017). Modeling of passenger transport correspondence between regional centers in Ukraine. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. – № 1/2(33). 44-48.

Доля К.В., Бугайов І.С.

Харківський національний університет міського господарства
імені О.М. Бекетова

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ

Анотація

Досліджено процес надання послуг з перевезення пасажирів на маршрутах загального користування. Отримано дані фактичних кореспонденцій пасажирів. Проведено дослідження можливості застосування відомих наукових підходів щодо розрахунку пасажирських транспортних кореспонденцій. Здійснено аналіз адекватності отриманих результатів. За результатами проведеної роботи винайдено параметри складових, при яких застосування розглянутих методів є можливим в рамках дослідженої системи.

Ключові слова: кореспонденція, пасажир, система, транспорт, гравітаційна модель.

Dolya C.V., Bugayov I.S.

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

MODELING TRANSPORT CORRESPONDENCE

Summary

The process of providing services to passengers on routes of General use. The data obtained the actual correspondence of passengers. A study of the application of known scientific approaches regarding the calculation of passenger vehicle trips. Feasible analysis of adequacy of obtained results. The results of the work invented by the parameters of components under which the application of the considered methods is possible in the framework of the studied system.

Keywords: correspondence, passenger, system, transport, gravity model.