

12. Valinskii O.S. Vostochnomu poligonu – osoboe vnimanie! [Special attention to the Eastern polygon!] *Lokomotiv [Locomotive]*, 2020. No. 3 (759). Pp. 2–4.
13. Gusachenko N.V. Vostochnaya podmena ne udalas': passazhiry ne pomogli gruzam [Eastern substitution failed: passengers did not help the cargo]. *RZHD-Partnyor [The RZD Partner]*, 2021. No. 3-4. Pp. 28–31.
14. Svetlakova E.N. Organizatsiya propuska tyazhelovesnykh poezdov na poligone Zabaikal'skoi zheleznoi dorogi [Organization of the handling of heavy trains at the polygon of the Trans-Baikal railway]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*, 2017. Vol. 1. Pp. 205–210.
15. Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Lytkina E.M. Zonal'naya sistema povysheniya nadezhnosti elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Zonal system of increasing the reliability of electric machines of traction rolling stock]. Moscow: The Training and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2018. 483 p.
16. Rusin D.L. Organizatsiya poligonnoi sistemy upravleniya tyagovym podvizhnym sostavom [Organization of a polygon control system for traction rolling stock]. *Innovatsionnyi transport [Innovative transport]*, 2019. No. 4 (34). Pp. 57–63. DOI 10.20291 / 2311-164X-2019-4-57-63.
17. Samuilov V.M., Solokhov V.B. Transportnaya strategiya razvitiya Vostochnogo poligona [Transport strategy for the development of the Eastern polygon]. *Innovatsionnyi transport [Innovative transport]*, 2021. No. 1 (39). Pp. 16–19. DOI 10.20291 / 2311-164X-2021-1-16-19/
18. Frol'tsov V.D., Shabunin A.B., Matyukhin V.G. Planirovanie tyagovykh resursov na Vostochnom poligone [Planning of traction resources at the Eastern polygon]. *Lokomotiv [Locomotive]*, 2019. No. 3 (747). Pp. 6–10.

Информация об авторах

Власенский Артем Андреевич – первый заместитель начальника Центра управления перевозками на Восточном полигоне, г. Иркутск, e-mail: vlasensky@gmail.com

Суханов Георгий Иванович – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sukhانov_gi@irgups.ru

Супруновский Антон Викторович – старший преподаватель кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: as.irgups@gmail.com

Белозерова Ирина Георгиевна – старший преподаватель кафедры управления эксплуатационной работой, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: belozerova.khv@mail.ru

Information about the authors

Artyom A. Vlasenskii – First Deputy Head of Transportation control center at the Eastern polygon, Irkutsk, e-mail: vlasensky@gmail.com

Georgii I. Sukhanov – Ph.D. of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Subdepartment of Management of Operational Work, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sukhанov_gi@irgups.ru

Anton V. Suprunovskii – Senior Lecturer of the Subdepartment of Management of Operational Work, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: as.irgups@gmail.com

Irina G. Belozerova – Senior Lecturer of the Subdepartment of Management of Operational Work, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: belozerova.khv@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).161-169

УДК 656.2

Оценка грузовой матрицы корреспонденций с учетом данных товарно-транспортных накладных и интенсивности движения

О.А. Лебедева¹, В.Е. Гозбенко^{1,2}✉

¹Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

²Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ vgozbenko@yandex.ru

Резюме

В статье обозначена проблема оценки грузовой матрицы корреспонденций с учетом данных товарно-транспортных накладных и интенсивности движения. Большинство методов оценки матриц корреспонденций основано на сравнении расстояний между восстановленной и исходной матрицей с учетом ограничений потока. В современной практике транспортного моделирования при оценке матрицы корреспонденций грузового движения чаще всего используется два вида информации. Это данные товарно-транспортных накладных и интенсивности транспортных потоков. Матрица, полученная на основе товарно-транспортных накладных, отражает только структуру движения грузов. Из-за ошибок, имеющихся в информации, матрица может отличаться от реального варианта транспортировки товаров. Цель исследования – оценить реальную матрицу корреспонденций, учитывая данные товарно-транспортных накладных (в виде матрицы движения товаров в обследуемой зоне) как исходную (априорную) матрицу, а также данные подсчета интенсивности движения (в соответствии с ограничениями производительности). Согласно имеющейся информации о товарно-транспортных накладных и подсчетах интенсивности транспортных потоков рассмотрен вариант оценки реальной матрицы корреспонденций грузового движения с применением стохастических моделей и с учетом схем выбора маршрута. Проведен анализ возможных ошибок в источниках информации – товарно-транспортной накладной и данных интенсивности движения – с оценкой каждого варианта. Для нахождения оптимальной оценки матрицы возможно использование откалиброванной модели максимизации энтропии с составной целевой функцией.

Таким образом, с использованием геоинформационной системы, калиброванных моделей распределения, а также функции энтропии становится доступна оценка матрицы корреспонденций на основе данных товарно-транспортных накладных.

Ключевые слова

матрица корреспонденций, улично-дорожная сеть, транспортный поток, моделирование

Для цитирования

Лебедева О. А. Оценка грузовой матрицы корреспонденций с учетом данных товарно-транспортных накладных и интенсивности движения / О. А. Лебедева, В. Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 161–170. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).161-170

Информация о статье

поступила в редакцию: 02.02.2021, поступила после рецензирования: 05.05.2021, принята к публикации: 15.05.2021

Estimation of the freight traffic mobility plan taking into account consignment notes and traffic intensity data

O.A. Lebedeva¹, V.E. Gozbenko^{1,2}✉

¹Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ vgozbenko@yandex.ru

Abstract

The article outlines the problem of estimation of freight traffic mobility plan, taking into account the data of consignment notes and traffic intensity. Most of the methods of estimating freight traffic mobility plans are based on comparing the distances between the reconstructed and the original mobility plan, taking into account the flow restrictions. In modern practice of transport modeling, two types of information are most often used when assessing the freight traffic mobility plan. These are the data of consignment notes and the intensity of traffic flows. The mobility plan obtained from the data of consignment notes reflects only the structure of the movement of goods. Due to errors in the information, the mobility plan may differ from the real version of the transportation of goods. The purpose of the study is to estimate the real mobility plan; taking into account the data of consignment notes (as a mobility plan of the movement of goods in the surveyed area) as the original (a priori) mobility plan, as well as the data for calculating the traffic intensity (in accordance with the performance constraints). According to the available information on consignment notes and calculations of the intensity of traffic flows, a variant of assessing the real freight traffic mobility plan is considered using stochastic models and taking into account route selection schemes. Possible errors in information sources – consignment note and traffic intensity data – are analyzed with estimation of each option. To find the optimal mobility plan estimate, a calibrated entropy maximization model with a composite objective function can be used. Thus, using a geographic information system, calibrated distribution models, as well as the entropy function, an estimate of the mobility plan based on the data of consignment notes becomes available.

Keywords

mobility plans, street and road network, traffic flow, modeling

For citation

Lebedeva O. A., Gozbenko V. E. Otsenka gruzovoi matritsy korrespondentsiy s uchuyotom dannykh tovarno-transportnykh nakladnykh i intensivnosti dvizheniya [Estimation of the freight traffic mobility plan taking into account consignment notes and traffic intensity data]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 161–170. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).161-170

Article Info

Received: 02.02.2021, Revised: 05.05.2021, Accepted: 15.05.2021

Введение

Матрица корреспонденций играет важную роль в анализе транспортного процесса. Она включает сведения о количестве рейсов или объемах перевозок между зонами, т. е. фактически показывает структуру спроса в исследуемой зоне. Стандартные методы сбора информации состоят из придорожного интервьюирования, являются дорогостоящими, тру-

доемкими и требуют больших временных затрат [1–7]. Эта задача приобретает актуальность в связи с изменениями в системе землепользования и численности населения, что сокращает точность собранных данных. Возникает необходимость разработки доступных методов оценки реальных и прогнозируемых матриц корреспонденций. Подсчет транспортных потоков позволяет получить информацию о

сумме всех пар корреспонденций, которые можно рассматривать как результат объединения матрицы поездок и схемы выбора маршрута. Этот источник данных очень привлекателен, поскольку подсчет транспортных потоков автоматизирован.

Важным этапом оценки спроса на перевозки является определение схемы выбора маршрута и пути проезда. Переменная P_{ij}^a используется для оценки доли ездки из зоны i в зону j (T_{ij}) проходящих через путь a . Таким образом, поток V_a является суммой всех поездок между зонами одного звена. Математически это можно выразить следующим образом [8-11]:

$$v_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a, P_{ij}^a = [0, 1].$$

Переменная P_{ij}^a может быть получена с использованием различных методов. Количество рейсов или объемы груза, которые были перемещены между зонами, должны быть преобразованы в количество транспортных средств V_a . На практике количество наблюдаемых транспортных потоков меньше количества неизвестных T_{ij} . Следовательно, невозможно найти однозначное решение задачи матричной оценки. Как правило, будет несколько матриц, которые при загрузке в сеть будут воспроизводить (удовлетворять) наблюдаемые транспортные потоки. Таким образом, можно восстановить наиболее «вероятную» или «лучшую» матрицу корреспонденций транспортных потоков. Практически все модели оценки матрицы корреспонденций используют априорную информацию. Предварительная информация может быть выражена в виде «целевой» или «начальной» матрицы корреспонденций и (или) количества ездки (количества грузов), привлеченных / произведенных в различных зонах. В этом случае исходная матрица может быть получена путем выборочного обследования или обновлением устаревшей матрицы. Это исследование было сосредоточено на оценке реальной матрицы в случае системы грузовых перевозок.

Математическая постановка задачи

Большинство методов оценки матриц корреспонденций основаны на сравнении расстояний между восстановленной и исходной матрицей с учетом ограничений потока. Следовательно, задача нахождения матрицы g при условии, что исходная матрица \hat{g} сформулирована, задается как минимизирующая функция $F_1(g, \hat{g})$. Статистически наблюдаемый набор данных подсчета транспортного потока является оцененным «реальным транспортным потоком». Следовательно, необходим алгоритм восстановления

матрицы, который воспроизводит «минимальные» различия между оцененными (v) и наблюдаемыми потоками \hat{v} , что может быть выражено как критерий $F_2(v, \hat{v})$, минимизирующийся с учетом установленных ограничений. Оптимизация в общем виде может быть выражена как

$$\begin{aligned} \min F(g, v) &= \gamma_1 F_1(g, \hat{g}) + \gamma_2 F_2(v, \hat{v}), \\ v &= \text{assign}(g), \\ v, g &\geq 0, \end{aligned}$$

где \hat{g} – начальная (целевая) матрица; \hat{v} – наблюдаемое количество транспортных потоков; F_1 и F_2 – меры расстояния [12]. Назначение g транспортной сети обозначается $\text{assign}(g)$, что приводит к разделению потоков g_{ij} по k -доступным маршрутам с потоками h_{ijk} .

Если целевая матрица корреспонденций является точной, то γ_1 должен быть больше, чем γ_2 , что приведет к g , близкому к \hat{g} . Тогда допустимы большие отклонения между v и \hat{v} . С другой стороны, наблюдаемые транспортные потоки должны быть надежны по сравнению с информацией в \hat{g} , а величина γ_2 должна быть больше γ_1 . Таким образом, значения весов (γ_i), связаны с концепцией модели. Следовательно, точность и надежность восстановленной матрицы корреспонденций зависит от модели распределения транспортных потоков по сравнению с реальной схемой выбора маршрута в исследуемой области [12–15].

Моделирование и существующие подходы

Существует множество подходов к оценке или обновлению матриц корреспонденций на основе подсчета транспортных потоков [13–20]. Равновесный подход производит оценку матрицы корреспонденций, которая удовлетворяет условиям назначения равновесия, а также согласуется с наблюдаемыми потоками. Такая модель подходит для оценки матрицы корреспонденций в густонаселенной городской местности. Подходы, основанные на моделировании транспортных потоков, включая модель «максимизация энтропии» и комбинированные модели планирования работы транспортной сети, оценивают наиболее вероятную матрицу на основе подсчета транспортных потоков в условиях пропорционального распределения. Оценка согласуется с ограничениями, имеющими задачу максимизации энтропии. Модель не требует данных ни о транспортных потоках в сети, ни исходную матрицу. Модифицированные модели для повышения точности

используют начальную матрицу. Если для восстановления используется только гравитационная модель или подобные алгоритмы, то такой подход может дать неточную оценку. В этой методике априорную матрицу принимают как единичную ($\widehat{g}_{ij} = 1$).

Для восстановления и оценки матриц применяются модели дискретного выбора. Эти модели основаны на вероятностном распределении функции максимума ряда случайных величин [21-23]. Вероятность того, что пользователь n выберет вариант i в наборе C_n , определяется выражением

$$P(i|C_n) = \frac{e^{\mu V_{in}}}{\sum_{j \in C_n} e^{\mu V_{jn}}}.$$

Свойство полиномиальных логит-моделей является ограничением для некоторых практических приложений. Создание набора при моделировании выбора маршрута может быть детерминированным или стохастическим. Существует множество подходов, включая алгоритм Дейкстры для определения пути с наибольшей полезностью, алгоритм k -кратчайших путей, методы Диала и Баррелла [24, 25] для поиска оптимальных путей, стохастическая модель на основе теории Маркова [26].

Методы максимизации энтропии активно использовались в качестве инструментов при разработке моделей в городском пространстве при планировании перевозочного процесса в 1970 г. Максимизация энтропии используется как нелинейная целевая функция для оценки наиболее вероятной матрицы, согласующейся с наблюдаемыми транспортными потоками (как линейные ограничения). Исходная задача (без априорной матрицы) записывается как [15]

$$\max S(T_{ij}) = -\sum_{ij} (T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij}).$$

При условии, что

$$\sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a - \widehat{V}_a = 0$$

для каждого подсчитанного a , и

$$T_{ij} \geq 0.$$

В общем виде задача с использованием методов с множителями Лагранжа λ_a записывается как

$$L = -\sum_{ij} (T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij}) - \sum_a \lambda_a (T_{ij} P_{ij}^a - \widehat{V}_a) = 0,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial T_{ij}} &= -\ln T_{ij} - \sum_a \lambda_a P_{ij}^a = 0 \\ \Rightarrow T_{ij} &= \exp\left(-\sum_a \lambda_a P_{ij}^a\right). \end{aligned}$$

Наличие матрицы, восстановленной на основе другого метода, может быть использовано как t -априорная (начальная) матрица, тогда новая целевая функция будет иметь вид

$$\max S_1\left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}}\right) = -\sum_{ij} \left(T_{ij} \ln \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij}\right).$$

Целевая функция является выпуклой, и член t_{ij} как константа используется для достижения большей точности. Используя эту методологию и замену переменных, решение может быть представлено в виде

$$T_{ij} = t_{ij} \exp\left(-\sum_a \lambda_a P_{ij}^a\right).$$

Одной из особенностей модели оценки матрицы максимальной энтропии является ее мультипликативный характер, т. е. если значение в предыдущей матрице равно нулю, оно останется нулевым и в новом решении. Один из вариантов решения этой задачи для разреженных матриц состоит в заполнении пустых ячеек небольшими значениями (0,5 поездки). Ограничения с помощью мультипропорционального алгоритма решения будут гарантировать, что некоторые значения вырастут до одной или нескольких поездок, в то время как другие вернутся к нулевому значению. Данный алгоритм из-за относительной эффективности и простоты программирования широко внедрен в практику. Однако в модели есть некоторые ограничения. Основное состоит в том, что подсчет транспортных потоков рассматривается как безошибочные наблюдения нестохастических переменных. Фактически модель предполагает полную достоверность подсчетов транспортных потоков и использует предыдущую матрицу только для компенсации матрицы оценки грузовых перевозок с применением дополнительной информации. Однако на практике могут быть ошибки в исходных данных и временных колебаниях интенсивности. Одним из вариантов решений является использование максимизации энтропии с многокритериальной функцией.

Источниками данных для оценки количества поездок между каждой парой корреспонденций является информация, касающаяся устаревшей матрицы, количества поездок (транспортных средств), схемы выбора маршрута. Надежность входных данных

может варьироваться. В процессе оценки матрицы корреспонденций пропорциональные значения обычно считаются фиксированными (без ошибок). Существующие ошибки можно интерпретировать как неопределенности в исходной матрице транспортных потоков [13]. Таким образом, необходимо учитывать два класса информации: исходную матрицу (t), вектор подсчета транспортных потоков \hat{v} , а также оценки величины ошибок во входных данных. В исходной модели максимизации энтропии предполагается, что значения \hat{v} фиксированы, а решение задачи оценки матрицы точно удовлетворяет уравнению $v_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a$. Можно предпо-

ложить неопределенность в показателе \hat{v} , но большинство моделей не допускают решений с отклонением от заданных значений.

Оценку матриц транспортных потоков можно рассматривать как многокритериальную задачу с условием удовлетворения двух условий t и \hat{v} . Значения t и \hat{v} соответствуют разным весам двух членов целевой функции, $F(t, T)$ и $F(v, \hat{v})$.

Многоцелевое программирование с использованием весовых коэффициентов – старый и эффективный метод. Математически многокритериальную задачу можно записать следующим образом:

$$\max Z(x) = [Z_1(x), Z_2(x), \dots, Z_p(x)], \\ x \in F_d$$

Таким образом, можно искать оптимальное решение

$$\max Z(x) = \sum_{k=1}^p W_k Z_k(x) \\ x \in F_d,$$

где W_k не может быть ни нулевым, ни отрицательным. Весовые коэффициенты считаются масштабными параметрами для каждой целевой функции. Задача оценки матрицы с использованием подсчета транспортных потоков может быть сформулирована как модель программирования [13]

$$\min \begin{cases} \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln g \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij} \right), \\ \sum_{ij} \left(v_a \ln \frac{v_a}{\hat{v}_a} - v_a + \hat{v}_a \right), \end{cases}$$

$$\sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a - v_a = 0, \quad a = 1, 2, \dots, M, \\ T_{ij} \geq 0.$$

Веса конфликтующих показателей (двух классов информации t и \hat{v}) могут быть выражены путем введения одного весового коэффициента. Обозначая весовые коэффициенты γ_1 и γ_2 , модель с одной целью может быть сформулирована как

$$\min \gamma_1 \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij} \right) + \\ + \gamma_2 \sum_a \left(v_a \ln \frac{v_a}{\hat{v}_a} - v_a + \hat{v}_a \right).$$

Коэффициенты можно масштабировать так, чтобы $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$. В этом случае γ_1 , и γ_2 должны быть предварительно определены. Решение называется оптимальным, если не существует другого, в котором цель будет достигнута более эффективным методом с учетом снижения эффективности других параметров [27]. Используя метод Лагранжа, оптимальное решение может быть выражено как

$$T_{ij} = t_{ij} \exp \left(1 - \frac{1}{\gamma_1} \sum_a \lambda_a P_{ij}^a \right), \\ v_a = \hat{v}_a \exp \left(\frac{\lambda_a}{\gamma_2} \right).$$

При условии наличия во входных данных дезагрегированной информации взвешенная модель максимизации энтропии может быть сформулирована как

$$\min \sum_{ij} a_{ij} \left(T_{ij} \ln \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij} \right) + \\ + \sum_a \beta_a \left(v_a \ln \frac{v_a}{\hat{v}_a} - v_a + \hat{v}_a \right) \left(\frac{\lambda_a}{\gamma_2} \right),$$

где a_{ij} – весовой коэффициент, соответствующий целевому значению в паре ij матрицы корреспонденций, а β_a – весовой коэффициент наблюдения транспортных потоков. Фактически предполагается, что веса определены как инверсия некоторой меры неопределенности. Спецификация весов определена в соответствии с опытом транспортного планирования и оценкой имеющихся данных. Если нет неопределенности в значении, мера неопределенности

равна нулю, а соответствующий весовой коэффициент стремится к бесконечности. Это означает, что $T_{ij} = t_{ij}$ или $V_a = \widehat{V}_a$.

Калибровка модели максимизации энтропии с композитной целевой функцией

В современной практике транспортного моделирования при оценке матрицы корреспонденций грузового движения чаще всего используется два вида информации. Это данные товарно-транспортных накладных (ТТН) и данные интенсивности транспортных потоков. Матрица, полученная из данных ТТН, отражает только структуру движения грузов. Из-за ошибок, имеющихся в информации, матрица может отличаться от реального движения товаров. Цель исследования – оценить реальную матрицу корреспонденций, учитывая данные ТТН (в виде матрицы движения товаров в обследуемой зоне) как исходную (априорную) матрицу, а также данные подсчета интенсивности движения (в соответствии с ограничениями производительности).

Информация, взятая из ТТН, является одной из наиболее ценных. Она фактически представляет структуру спроса на грузовые перевозки. Опираясь на нее, можно выделить две группы неточностей:

- ошибки, которые могут появляться в процессе сбора и сохранения информации в соответствующих базах данных;
- ошибки, из-за несоответствия информации ТТН с реальными данными о транспортировке товара.

Причина второй ошибки – неполучение водителями транспортных средств ТТН.

В обследовании интенсивности движения транспортного потока выделяют два вида ошибок:

- человеческий фактор и систематические ошибки (выбор обследуемых остановочных пунктов, установка счетчиков, инструктажи имеют важное влияние на количество ошибок данного типа);
- неэффективный промежуток времени для исследования движения.

Для оценки среднегодового суточного потока интенсивности движения транспортных средств необходимо проводить учет в течение всего года и (или) в обычные будние (непраздничные) дни.

Когда ошибки существуют относительно каждого источника информации возможно использование энтропийного метода многоцелевой функции. В этом методе при калибровке моделей имеют большее значение агрегированные λ_1 и λ_2 или дезагрегированные весовые коэффициенты a_{ij} и β_a . Однако использование последних практически невозможно из-за сложностей, вызванных дезагрегированной информацией. Для калибровки многоцелевой функции энтропии используются агрегированные весовые коэффициенты.

В этой связи в условиях недостатка информации

и сложности определения весовых коэффициентов использование экспертной оценки может оказаться полезным.

В исследовании рассмотрена иерархическая система оценки исходной и восстановленной матрицы движения грузов. Два критерия:

- «систематические ошибки» (человеческий фактор, ошибки при разработке методологии обследования и ошибки во время сбора и сохранения данных);
- «охват ошибок» (ошибки из-за отсутствия ТТН, неправильного выбора временного интервала для сбора данных и небольшой выборки данных).

Рассмотрим экспертную систему ранжирования, применяемую при проведении опросов (табл. 1).

Таблица 1. Экспертная система ранжирования
Table 1. Expert ranking system

Экспертная оценка	Балл
С допустимой погрешностью и точностью 99 %	20
С допустимой погрешностью и точностью 90 %	15
С высокой погрешностью и точностью 50 %	10
Высокий уровень ошибок	5
Очень высокий уровень ошибок	0

Традиционно профессиональные эксперты в области менеджмента и транспортного планирования используют шкалу от 0 до 20 для интервьюирования.

Результаты показывают, что рассмотренные подходы отличаются, но для комплексного учета они должны быть объединены в четыре усредненных числа. Следовательно, в каждом условии предлагается применять среднее геометрическое полученных оценок, получаемое следующим образом:

$$W_{ij} = (W_{ij}^1 \times W_{ij}^2 \times \dots \times W_{ij}^n)^{\frac{1}{n}},$$

где W_{ij} – вес i с учетом критерия j , а W_{ij}^n – вес, относящийся к каждому отдельному n показателю. Среднее геометрическое значение исследуемых показателей включает учет интенсивности транспортных потоков и данные спроса на грузовые перевозки ТТН относительно «систематических ошибок» и «ошибок покрытия», рассчитанных согласно экспертной оценке.

Критерии попарно сравниваются между собой в матрице относительно источников ошибок (табл. 2).

Таблица 2. Парное сравнение относительно ошибок в источниках данных
Table 2. Pairwise comparison regarding errors in data sources

	Систематическая ошибка	Ошибка покрытия
Систематическая ошибка	1	α
Ошибка покрытия	$1/\alpha$	1

Для вычисления ошибок после определения среднего геометрического из элементов предыдущей матрицы полученные показатели нормализуются. Нормализация – это вес каждого из источников информации относительно двух видов ошибок (табл. 3).

Таблица 3. Нахождение среднего геометрического и нормализации «веса» ошибки
Table 3. Finding the geometric mean and normalization of the “weight” of the error

Критерии	Среднее геометрическое	Нормализованные веса
Систематическая ошибка	$(a * 1)^{1/2} = \sqrt{a}$	$\frac{a}{1+a}$
Ошибка покрытия	$\left(a * \frac{1}{a}\right)^{1/2} = \frac{1}{\sqrt{a}}$	$\frac{1}{1+a}$
Общее	$\sqrt{a} + \frac{1}{\sqrt{a}}$	1

«Веса» для ГТН и информации об интенсивности движения приблизительно равны 0,5, тогда коэффициенты λ_1 и λ_2 можно принять равными этому значению, т. е. по экспертным оценкам степень достоверности каждого из источников информации одинакова и равна 50 %. Таким образом, модель, основанная на методе максимизации энтропии со сложной целевой функцией, калибруется следующим образом:

$$\min 0,5 \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln g \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij} \right) + 0,5 \sum_a \left(v_a \ln \frac{v_a}{\hat{v}_a} - v_a + \hat{v}_a \right),$$

где T_{ij} – маршрут между пунктом отправления i и пунктом назначения j ; t_{ij} – рейс между пунктом отправления i и пунктом назначения j в исходной матрице; V_a – расчетный объем интенсивности транспортного потока по дуге a ; v_a – наблюдаемый объем транспортного потока по дуге a ; P_{ij}^a – доля использования дуги a в транспортном процессе между пунктом отправления i и пунктом назначения j .

Из-за равенства весов, целевая функция может быть упрощена:

$$\min \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij} \right) +$$

$$+ \sum_a \left(v_a \ln \frac{v_a}{\hat{v}_a} - v_a + \hat{v}_a \right).$$

Методология оценки матриц грузового движения

При наличии исходной информации оценка реальной матрицы корреспонденций спроса на грузовые перевозки осуществляется с применением следующей методологии:

1. Подготовка информации из исходной матрицы. Преобразование годового объема перевозок груза в количество грузового транспорта:

$$N = \frac{W}{P_{avg} \sum_{i=1}^n p_i v_i},$$

$$N = \frac{1,3 \times W}{\sum_{i=1}^n p_i W_i (1 - p_{ei})},$$

где N – общее количество грузового подвижного состава всех типов, которые перевозят груз W ; W – объем ежегодно перевозимого груза между парой пунктов отправления и назначения в кг; P_{avg} – средняя плотность перевезенного груза; p_i – средний процент грузового подвижного состава типа i , который отправляется в сети из n пунктов; v_i – средняя грузоподъемность грузовых автомобилей i -го типа; W_i – средний вес загруженных автомобилей типа i в кг (сумма среднего веса подвижного состава типа i и среднего веса груза); p_{ei} – средний процент не задействованных автомобилей типа i [28].

2. Подготовка информации об улично-дорожной сети и интенсивности дорожного движения (необходимо использовать геоинформационную среду). База данных и графические данные доступны в режиме реального времени что является важным для аналитических инструментов.

3. Оценка доли «дуги» a в грузовом транспортном потоке. Транспортная сеть междугородних автомобильных дорог обычно не перегружена, а значения P_{ij}^a в модели оценки можно измерить экстенсивно и независимо от процесса оценки матрицы. Откалиброванные модели назначения можно рассматривать как основу для этого расчета. Далее необходимо определить кратчайший путь между каждой парой пунктов.

4. Восстановление матрицы корреспонденций с использованием информации о ГТН, интенсивности транспортных потоков по дугам (сегментам) сети и экспертной оценке. Также необходимо рассчитать

долю каждого маршрута и долю каждой дуги (в случае транспортировки грузов). Следовательно, для решения поставленной задачи возможно использование откалиброванной модели, основанной на методе нелинейного программирования максимизации энтропии с составной целевой функцией.

Заключение

Согласно имеющейся информации о ТТН и подсчетах интенсивности транспортных потоков рассмотрен вариант обновления существующей матрицы для грузового движения с применением стоха-

стических моделей и учетом схем выбора маршрута.

Проведен анализ возможных ошибок в источниках информации – ТТН и данных интенсивности движения с оценкой каждого варианта. Для нахождения оптимальной оценки матрицы откалибрована модель максимизации энтропии с составной целевой функцией. Таким образом, с использованием геоинформационной системы, калиброванных моделей распределения, а также функции энтропии возможно применение методологии оценки матрицы корреляций на основе данных ТТН.

Список литературы

1. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Моделирование грузовых перевозок в транспортной сети // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2016. № 10. С. 182–184.
2. Лебедева О.А., Антонов Д.В. Моделирование грузовых матриц корреспонденций гравитационным и энтропийным методами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5 (100). С. 118–122.
3. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Развитие городских грузовых систем с учетом концепции городского планирования: сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 1. С. 244–247.
4. Федотова А.С., Лебедева О.А. Степень использования пропускной способности автомобильных дорог: сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2015. Т. 1. № 1. С. 270–274.
5. Полтавская Ю.О. Применение геоинформационных систем для обеспечения устойчивого развития транспортной системы города // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сборник научных трудов VI Международной научной конференции / под ред. О.Г. Берестневой, В.В. Спицына, А.И. Труфанов, Т.А. Гладковой. 2019. С. 164–167.
6. Полтавская Ю.О. Оптимизация транспортной сети на основе минимума общих затрат на доставку грузов // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. № 13. С. 178–183.
7. Шаров М.И., Михайлов А.Ю., Дученкова А.В. Пример оценки транспортной доступности с использованием программного продукта РТВ «VISUM» // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2013. № 1(4). С. 133–138.
8. Лебедева О.А. Анализ проектирования транспортных зон на основе моделирования сети // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. № 13. С. 172–177.
9. Гозбенко В.Е., Крипак М.Н., Иванков А.Н. Совершенствование транспортно-экспедиционного обслуживания грузопользователей. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2011. 176 с.
10. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. 427–433.
11. Afandizadeh S., Yadi S.M. *Hamedani Iranian Journal of Science & Technology*, 2006. Vol. 30. No. B1.
12. Abrahamsson T. Estimation of origin-destination matrices using traffic count. *international institute for applied systems, Austria*. 1998.
13. Hensher D.A., Button K. J. *Handbook of transportation modelling*. Pergamon. 2000.
14. Moore J.E., Kim G. Evaluating system ATMIS technology via rapid estimation of network flows. *Final Report, University of Southern California*. 1997.
15. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. *Modelling transport*. Third edition, John Wiley & Sons. 2001.
16. Train K. *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge University Press. 2002.
17. Kleinbaum D.G., Klein M. *Logistic regression*. Second edition, Springer. 2002.
18. Ben-Akiva M., Bierlaire M. *Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions*. *Handbook of Transportation Science*, Chapter. 1999.
19. Papacostas C.S., Prevedouro P.D. *Transportation engineering and planning*. Second edition, Prentice-Hall. 2001.
20. Philips D.T., Garcia-Diaz A. *Fundamentals of network analysis*, Prentice-Hall. 1981.
21. Кузьмин О.В., Старков Б.А. Бинарные матрицы с арифметикой треугольника паскаля и символные последовательности. *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика*. 2016. Т. 18. С. 38–47.
22. Кузьмин О.В. построение обобщенных А- и В-полиномов в пространстве отображений. В сборнике: *Методы дискретного анализа в теории графов и сложности*. Новосибирск, 1992. С. 66–76.
23. Кузьмин О.В., Леонова О.В. Полиномы Тушара и их приложения. *Дискретная математика*. 2000. Т. 12. № 3. С. 60–71.
24. Burrell J.E. Multiple route assignment: a comparison of two methods. *International Symposium of Traffic Equilibrium Methods*, Montreal. 1974.
25. Dial R.V. A probabilistic multipath assignment model which obviates path enumeration. *Transportation Research* 9. 1975. Pp. 123–128.
26. Maher M. *SAM – a stochastic assignment model, mathematics in transportation planning and control*. Oxford University Press, 1991. Pp. 121–132.

27. Brenninger-Gothé M., Jurnsten K.O. Estimation of origin-destination matrices from traffic count using multi-objective programming formulation. *Transportation Research. Part. B*, 23B(4). 1989. Pp. 257–269.
28. Krishnan V., Hancock K.L. Highway freight flow assignment in Massachusetts using geographic information system. *Transportation Research Record*, 1998. No. 1625.

References

1. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Modelirovanie gruzovykh perevozok v transportnoi seti [Freight traffic modeling in the transport network]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2016. No. 10. Pp. 182–184.
2. Lebedeva O.A., Antonov D.V. Modelirovanie gruzovykh matrits korrespondentsii gravitatsionnym i entropiinyim metodami [Modeling cargo correspondence matrices by gravitational and entropy methods]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2015. No. 5 (100). Pp. 118–122.
3. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Razvitie gorodskikh gruzovykh sistem s uchedom kontseptsii gorodskogo planirovaniya [Development of urban cargo systems taking into account the concept of urban planning]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Collection of scientific papers of Angarsk State Technical University]*, 2016. Vol. 1. No. 1. Pp. 244–247.
4. Fedotova A.S., Lebedeva O.A. Stepen' ispol'zovaniya propusknoi sposobnosti avtomobil'nykh dorog [The degree of utilization of the throughput capacity of motor highways]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Collection of scientific works of Angarsk State Technical University]*, 2015. Vol. 1. No. 1. Pp. 270–274.
5. Poltavskaya Yu.O. Primenenie geoinformatsionnykh sistem dlya obespecheniya ustoichivogo razvitiya transportnoi sistemy goroda [Application of geographic information systems to ensure sustainable development of the city's transport system]. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, upravlenii, sotsial'noi sfere i meditsine: sbornik nauchnykh trudov VI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. Pod red. O.G. Berestnevoi, V.V. Spitsyna, A.I. Trufanov, T.A. Gladkovoii [Information technologies in science, management, social sphere and medicine Collection of scientific papers of the VI International scientific conference. In Berestnev O.G., Spitsyn V.V., Trufanov A.I., Gladkov T.A. (eds)], 2019. Pp. 164–167.
6. Poltavskaya Yu.O. Optimizatsiya transportnoi seti na osnove minimuma obshchikh zatrat na dostavku gruzov [Optimization of the transport network based on the minimum total costs for the delivery of goods]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2019. No. 13. Pp. 178–183.
7. Sharov M.I., Mikhailov A.Yu., Duchenkova A.V. Primer otsenki transportnoi dostupnosti s ispol'zovaniem programmnoogo produkta PTV «VISUM» [An example of assessing transport accessibility using the software product PTV “VISUM”]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' [Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate]*, 2013. No. 1 (4). Pp. 133–138.
8. Lebedeva O.A. Analiz proektirovaniya transportnykh zon na osnove modelirovaniya seti [Analysis of the design of transport zones based on network modeling]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2019. No. 13. Pp. 172–177.
9. Gozbenko V.E., Kripak M.N., Ivankov A.N. Sovershenstvovanie transportno-ekspeditsionnogo obsluzhivaniya gruzovladel'tsev [Improvement of freight forwarding services for cargo owners]. *Irkutsk: IrGUPS Publ.*, 2011. 176 p.
10. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. 427–433.
11. Afandizadeh S., Yadi S.M. *Hamedani Iranian Journal of Science & Technology*, 2006. Vol. 30. No. B1.
12. Abrahamsson T. Estimation of origin-destination matrices using traffic count. *International institute for applied systems, Austria*. 1998.
13. Hensher D.A., Button K. J. *Handbook of transportation modelling*. Pergamon. 2000.
14. Moore J.E., Kim G. Evaluating system ATMIS technology via rapid estimation of network flows. *Final Report, University of Southern California*. 1997.
15. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. *Modelling transport*. Third edition, John Wiley & Sons. 2001.
16. Train K. *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge University Press. 2002.
17. Kleinbaum D.G., Klein M. *Logistic regression*. Second edition, Springer. 2002.
18. Ben-Akiva M., Bierlaire M. Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions. *Handbook of Transportation Science*, Chapter. 1999.
19. Papacostas C.S., Prevedouro P.D. *Transportation engineering and planning*. Second edition, Prentice-Hall. 2001.
20. Philips D.T., Garcia-Diaz A. *Fundamentals of network analysis*, Prentice-Hall. 1981.
21. Kuzmin O. V., Starkov B. A. Binary matrices with Pascal's triangle arithmetic and symbolic sequences. *News of the Irkutsk State University. Series: Mathematics*. 2016. Vol. 18. pp. 38–47.
22. Kuzmin O. V. Construction of generalized A- and B-polynomials in the mapping space. In the collection: *Methods of discrete analysis in graph theory and complexity*. Novosibirsk, 1992. pp. 66–76.
23. Kuzmin O. V., Leonova O. V. Tushar polynomials and their applications. *Discrete mathematics*. 2000. Vol. 12. No. 3. pp. 60–71.
24. Burrell J.E. Multiple route assignment: a comparison of two methods. *International Symposium of Traffic Equilibrium Methods*, Montreal. 1974.
25. Dial R.B. A probabilistic multipath assignment model which obviates path enumeration. *Transportation Research* 9. 1975. Pp. 123–128.

26. Maher M. SAM – a stochastic assignment model, mathematics in transportation planning and control. Oxford University Press, 1991. Pp. 121–132.

27. Brenninger-Gothe M., Jurnsten K.O. Estimation of origin-destination matrices from traffic count using multi-objective programming formulation. Transportation Research. Part. B, 23B(4). 1989. Pp. 257–269.

28. Krishnan V., Hancock K.L. Highway freight flow assignment in Massachusetts using geographic information system. Transportation Research Record, 1998. No. 1625.

Информация об авторах

Лебедева Ольга Анатольевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: kravhome@mail.ru.

Гозбенко Валерий Ерофеевич – д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

Information about the authors

Ol'ga A. Lebedeva – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor at the Subdepartment of Management of Automobile Transport, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: kravhome@mail.ru.

Valerii E. Gozbenko – Doctor of Engineering Science, Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).170-180

УДК 629.4.025

Техническое решение повышения уровня надежности фазорасщепителей электровозов переменного тока

Н. П. Асташков, В. А. Оленцевич✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ olencevich_va@mail.ru

Резюме

Эффективная работа по реализации планов увеличения пропускной и провозной способностей транспортной инфраструктуры Восточного полигона в полной мере обеспечивается локомотивным комплексом. Повышение тягово-энергетических, скоростных характеристик и экономичности локомотивного парка ОАО «Российские железные дороги» возможно за счет обеспечения устойчивой работы элементов подвижного состава. Актуальность представленной работы доказывает производство и испытание современных локомотивов нового поколения с асинхронным тяговым приводом. Основным ориентиром конструкторов и разработчиков являются решения, которые позволят обеспечить высокие тягово-энергетические показатели электровоза. Учет специфических условий эксплуатации и факторов, оказывающих непосредственное влияние на режимы работы, долговечность и надежность, позволили обосновать структуру и разработать алгоритм работы предложенной системы управления. Руководствуясь отчетами и статистическими данными локомотивных депо Восточного полигона о надежности работы электрооборудования, находящихся в эксплуатации электровозов следует, что используемые для защиты вспомогательных машин аппараты имеют недостатки, обусловленные наличием большого количества случайных факторов, предопределяющих их срабатывание. Технической предпосылкой разработки предложенной системы с адаптацией к условиям эксплуатации является реализация последовательного пуска электродвигателей нагрузки на пониженной частоте вращения. Отказ от использования различных систем автоматического регулирования производительностью вентиляторов электровозов обусловлен низкими энергетическими показателями преобразователей в режимах управления. Фазорасщепитель, обладая несомненными достоинствами, в свою очередь, не позволяет реализовать «мягкий» пуск электродвигателей нагрузки. В настоящее время существуют множество устройств плавного пуска, преимущества применения которых очевидны благодаря широкому спектру функциональных возможностей. Сопоставление данных устройств с предложенной в рамках статьи системой доказывает ее целесообразность как с технической, так и финансово-экономической позиции.

Ключевые слова

безопасность перевозочного процесса, надежность электроподвижного состава, условия эксплуатации электрооборудования, фазорасщепитель, полупроводниковый преобразователь частоты, мотор-вентилятор, система управления, алгоритм работы

Для цитирования

Асташков Н. П. Техническое решение повышения уровня надежности фазорасщепителей электровозов переменного тока / Н. П. Асташков, В. А. Оленцевич // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 170–180. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).170-180

Информация о статье

поступила в редакцию: 17.03.2021, поступила после рецензирования: 06.04.2021, принята к публикации: 05.05.2021