

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ НА КАРШЕРИНГ

Корягин Марк Евгеньевич,

Сибирский государственный университет путей сообщения,
Новосибирск, Россия, markkoryagin@yandex.ru

Извеков Владислав Сергеевич,

Сибирский государственный университет путей сообщения,
Новосибирск, Россия, vlad-izvekov@mail.ru

Катаргин Владимир Николаевич,

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия,
vkatargin@sfu-kras.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-9-42-47

Manuscript received 02 April 2021;

Revised 20 May 2021;

Accepted 23 June 2021

Keywords: каршеринг, метод "ближайшего соседа",
процессы гибели и размножения, управление спросом.
городская транспортная система

Значительный рост использования каршеринга в России и в мире привел к необходимости формального описания процесса выполнения заказов на данном сервисе. В работе представлена математическая модель расчета расстояния до свободного автомобиля, построенная на основе метода "ближайшего соседа". Предложена модель формирования спроса в зависимости от потенциального количества клиентов и вероятности найти автомобиль в области пешей доступности. Случайный процесс изменения количества свободных автомобилей описан на основе процесса гибели и размножения. В данном процессе интенсивность уменьшения количества свободных автомобилей зависит от вероятности найти автомобиль. Получены оценки среднего количества свободных автомобилей и их средней загрузки и вероятности найти свободный автомобиль каршеринга в зоне пешей доступности. Комбинация представленных моделей позволяет оценить влияние количества автомобилей на спрос. В частности на численном примере показано, что увеличение автопарка может приводить к увеличению коэффициента использования автомобильного парка, а не к его снижению. Таким образом, можно сделать вывод о том, что только более масштабный проект каршеринга сможет быть экономически эффективным лишь при наличии большого автопарка, т.е. высокой плотности свободных автомобилей.

Информация об авторах:

Корягин Марк Евгеньевич, профессор кафедры "Высшей математики", Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

Извеков Владислав Сергеевич, преподаватель кафедры "Высшей математики", Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия,

Катаргин Владимир Николаевич, профессор, кандидат технических наук, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Для цитирования:

Корягин М.Е., Извеков В.С., Катаргин В.Н. Математическая модель управления спросом на каршеринг // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №9. С. 42-47.

For citation:

Koryagin M.E., Izvekov V.S., Katargin V.N. (2021) A mathematical model of demand management for carsharing. *T-Comm*, vol. 15, no.9, pp. 42-47. (in Russian)

Сложная транспортная ситуация в крупных городах требует современного подхода связанного с моделированием и управлением спросом на пассажирские перевозки. Управление спросом на транспорте может быть экономически эффективной альтернативой увеличению пропускной способности инфраструктуры города, решению экологических проблем и улучшения здоровья населения [16].

Использование стратегий информирования и стимулирования пассажиров может привести к максимальному повышению эффективности транспортной системы, что приведет к повышению мобильности, уменьшению заторов и снижению вредных выбросов транспортных средств [17].

Моделирование перевозок необходимо для оценки количества транспортных средств и пассажиров в будущем. Данные о текущих перевозках необходимо рассматривать совместно с другими известными данными, такими как население, занятость, тарифы на перевозку, транспортные расходы. Современные технологии облегчают доступ к большим объемам необходимой для моделирования информации, предоставляя возможность разрабатывать новые алгоритмы для значительного повышения предсказуемости и точности оценок.[18]

Прогнозы передвижения используются для нескольких ключевых целей в транспортной политике: для расчета пропускной способности инфраструктуры, финансовой и социальной жизнеспособности проектов, и для расчета воздействия на окружающую среду.

Четыре этапа классической модели системы планирования городского пассажиропотока [19]:

- Генерация поездок. Необходимо определить количество потенциальных потребностей населения города в передвижениях, которые зависят от множества факторов: культуры, экономики, размеров и структуры города, демографической ситуации и так далее.

- Распределение поездок. Большинство потребностей человека в городе может быть реализовано множеством вариантов. Выбор зависит в первую очередь от транспортной доступности данного варианта.

- Выбор способа передвижения вычисляет долю поездок между пунктами отправления и назначения различными видами транспорта, включая пешие передвижения.

- И наконец, выбор маршрута передвижения распределяет поездки по маршрутам города. При передвижении на автомобиле выбор множества автомобилистов приводит к перегрузке определенных участков улично-дорожной сети. Следование личным интересам (первый принцип Вардропа) противоречит интересам общества (второй принцип Вардропа). То есть взаимодействие автомобилистов поможет значительно снизить время передвижения.

В данной статье рассматривается вопрос выбора способа передвижения при добавлении дополнительной современной альтернативы каршеринга.

На долю улично-дорожной сети российских городов приходится не более 10% городской территории, и дальнейший рост уровня автомобилизации ведет к транспортному коллапсу. Стоит вопрос – как можно снизить территорию используемую автомобилями? В первую очередь [1] нужно рассматривать транспортные средства, которые большую часть времени простоявают и это личные автомобили. Снижение количества личных автомобилей и, даже снижение

количества передвижений в наиболее загруженные места (например, в центр города с ограниченным количеством парковочных мест) позволить повысить эффективность транспортной системы. Например, многомерный статистический анализ показал, что в Москве существуют большие проблемы с нарушениями при парковках связанные с недостаточным количеством мест [10].

В настоящее время существует несколько направлений решения данной задачи. Во-первых, это развитие общественного транспорта или такси [2]. С другой стороны у многих существует потребность вождении автомобиля, а также множество мелких дел, да и еще связанных с перевозкой грузов. В мировой практике, одним из решений данной проблемы служит система совместного использования автомобиля. Каршеринг позволяет снять с клиента постоянные расходы, связанные с владением автомобилем. Для города это значит замена 6-15 автомобилей на 1, с соответствующим снижением количества парковок, а также снижение пробега автомобилей в два раза, с соответствующим снижением загрузки дорог [14].

Совместное использование автомобилей стало перерастать в сервис более 20 лет назад [11]. При этом в России агрегаторы каршеринга развиваются лишь 7 лет [4], однако за столь короткий срок Москва вышла на первое место в мире по количеству автомобилей каршеринга. Несмотря на это для развития каршеринга существует множество проблем для агрегатора, других участников движения, пассажиров, транспортной системы города в целом.

Многие исследователи занимаются математическим моделированием каршеринга. В [12] представлена математическая модель описывающая перемещение автомобилей каршеринга в места формирования спроса, что позволяет сделать его более эффективным, ведь в течение суток места возникновения спроса и притяжения меняются местами. Подобной задачей занимаются и отечественные авторы [3]. В [12] представлена модель описывающая перемещение пассажиров каршеринга в аэропорт Бостона. В [6] предлагается использовать для каршеринга электромобили с оптимизацией инфраструктуры для данного вида транспорта. Развитие идеи электромобилей рассмотрено в диссертации [5], однако, в текущих условиях низких цен на топливо данная система экономически проигрывает каршерингу, построеному на неэлектрических автомобилях.

В данной статье, предложена модель формирования спроса на услуги каршеринга. В отличие от предшествующих работ рассматривается случайный процесс изменения количества свободных автомобилей и отказ в услуге при отсутствии автомобилей в зоне пешей доступности.

Математическая постановка задачи

В настоящее время главной движущей силой экономики является спрос. Вопросы формирования и управления спросом являются важнейшими как для отдельных предприятий, так и для государств в целом.

Потенциальные клиенты каршеринга это те люди, которые знают про данную услугу, обычно пользовались ей и имеют установленное приложение по поиску свободных автомобилей. Рассчитать количество таких пользователей и динамику их изменения довольно сложно, так как множест-

во факторов, в том числе культурных и исторических влияют на поведение населения города. Поэтому на некоторый промежуток времени зафиксируем потенциальную интенсивность спроса – Λ (потенциальных поездок в час).

Лишь часть потенциальных поездок может быть реализована. В частности клиентам требуется различная надежность поездок. То есть некоторые клиенты будут использовать сервис только в том случае если вероятности найти автомобиль на доступном расстоянии близка к 100%. Другие потребители все равно будут просматривать местоположение автомобилей, даже если вероятность его найти небольшая.

Пусть $\delta = \delta(p)$ – доля людей (поездок) которые просматривают информацию о наличие автомобиля каршеринга поблизости и при его наличии осуществляющие заказ, где p – средняя вероятность найти автомобиль в пешей доступности.

Очевидно, что если автомобиль невозможно найти то никто и не будет просматривать сайт сервиса, а если автомобиль всегда можно найти, то все потенциальные клиенты будут использовать сервис.

$$\begin{aligned}\delta(0) &= 0 \\ \delta(1) &= 1\end{aligned}$$

Предположим вид зависимости

$$\delta(p) = p^\alpha \quad (1)$$

где, например, $\alpha = 2$. То есть если вероятность найти автомобиль 50%, то лишь 25% клиентов будут пользоваться сервисом, а если вероятность 10%, то лишь 1% будут искать автомобиль. Данная зависимость изменяется не мгновенно, а оценивается эмпирически на основании опыта потенциальных клиентов и их знакомых.

Тогда фактическая интенсивность спроса (т.е. доля клиентов ищущих автомобили).

$$\lambda(p) = \Lambda \delta(p) \quad (2)$$

При этом заявки будут обслужены лишь при наличии автомобилей, т.е. с вероятностью p . Поэтому интенсивность выполненных заказов составит

$$p\lambda(p) = p\Lambda \delta(p) \quad (3)$$

В результате исследований в г. Красноярск [15] установлено, что время выполнения заказа описывается экспоненциальным распределением со средним чуть более 1,5 часа (интенсивность обслуживания $\mu = 0,65$), тогда функция распределения времени обслуживания

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-0,65x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Рассмотрим задачу поиска автомобилей. Важной характеристикой при оценке расстояния до автомобиля является плотность автомобилей. На рисунке показано, что на практике автомобили не могут быть расположены равномерно, поэтому нельзя обеспечить 100% вероятность найти автомобиль в пешей доступности. Поэтому воспользуемся методом «ближайшего соседа» [7, 8].

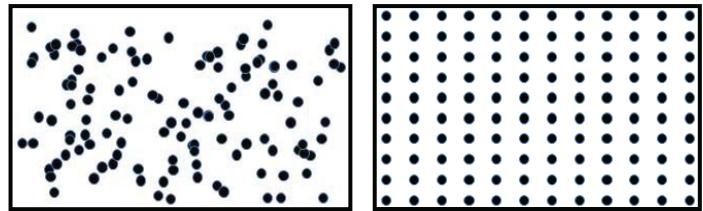


Рис. 1. Равномерное и случайное распределение объектов на плотности

Среднее расстояние до ближайшего соседа, ожидаемое при случайному распределении объектов [8]

$$m = \frac{1}{2\sqrt{p}} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{n}}, \quad (3)$$

где p средняя плотность объектов, количество объектов n на единицу площади S .

Стандартное отклонение составит [8]

$$\sigma = \frac{0,26136\sqrt{S}}{\sqrt{n}}, \quad (4)$$

Отметим что чем больше количество автомобилей, тем меньше среднее расстояние до автомобиля и тем

расстояния между объектами описывается нормальным распределением [8]. Функция распределения расстояния до автомобиля l зависит от количества автомобилей n .

$$G(l, n) = \int_0^l \frac{1}{\sigma(n)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m(n))^2}{\sigma^2(n)}} dx \quad (5)$$

Вероятность найти автомобиль в зоне пешей доступности (не дальше l_{max})

$$q(n) = G(l_{max}, n) \quad (6)$$

образом, чем больше автомобилей и расстояние, которое клиент может до него пройти, тем выше вероятность, что заказ будет выполнен.

Вторая проблема заключается в том, что спрос возникает случайно от независимых людей, таким образом, его можно описать через пуассоновский поток. При этом также время обслуживания случайно, поэтому и количество свободных автомобилей не постоянно. Поэтому рассмотрим случайный процесс изменения количества свободных автомобилей как процесс гибели и размножения (Рис.2). Количество свободных автомобилей (из общего N) увеличивается интенсивностью их обслуживания, при этом если свободно 5 автомобилей, то заняты $N-5$, которые генерирует поток высвобождающихся автомобилей ($N-5$) μ . Поток заказов уменьшает количество свободных автомобилей, при этом еще и снижается вероятность найти свободный автомобиль (растет число отказов). Например, если свободно 5 автомобилей, то вероятность найти автомобиль составит $q(5)$, а вероятность получить отказ (потерять заказ) $1-q(5)$.

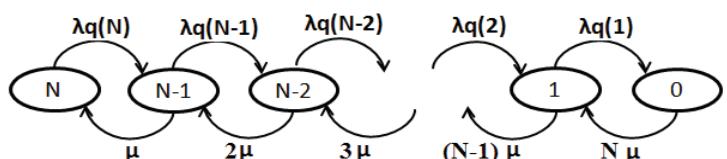


Рис. 2. Схема гибели и размножения свободных автомобилей

Запишем решение системы уравнений Колмогорова для данной схемы гибели и размножения (p_n – вероятность, что свободно n автомобилей).

$$p_1 = \frac{N\mu}{\lambda q(1)} p_0 \quad (7)$$

$$p_2 = \frac{\lambda^2 q(1)q(2)}{N(N-1)\mu^2} p_0 \quad (8)$$

...

$$p_{N-1} = \frac{N(N-1)(N-2)\dots 2\mu^{N-1}}{\lambda^{N-1}q(1)q(2)\dots q(N-1)} p_0 \quad (9)$$

$$p_N = \frac{N!\mu^N}{\lambda^N q(1)q(2)\dots q(N)} p_0 \quad (10)$$

$$p_0 = \left(1 + \frac{N\mu}{\lambda q(1)} + \frac{\lambda^2 q(1)q(2)}{N(N-1)\mu^2} + \dots + \frac{N(N-1)(N-2)\dots 2\mu^{N-1}}{\lambda^{N-1}q(1)q(2)\dots q(N-1)} + \frac{N!\mu^N}{\lambda^N q(1)q(2)\dots q(N)} \right)^{-1} \quad (11)$$

Последнее уравнение предназначено для нормировки вероятностей. Фактически получаем многоканальную марковскую систему массового обслуживания с отказами.

Среднее количество свободных автомобилей рассчитывается как математическое ожидание

$$\bar{N} = \sum_{n=1}^N n p_n \quad (12)$$

Средняя вероятность найти автомобиль в пешей доступности рассчитывается как математическое ожидание найти автомобиль при различном количестве свободных

$$p = \sum_{n=1}^N q(n) p_n = \frac{(N-\bar{N})\mu}{\lambda} \quad (13)$$

Коэффициент использования автомобильного парка (то есть средняя вероятность занятости автомобиля)

$$\frac{(N-\bar{N})}{N}. \quad (14)$$

Численный пример

Рассмотрим численный пример. Он основан на данных города Красноярска [9]. Пусть в городе площадью $S=348$ квадратных километров сервис аренды построен на $N=50$ автомобилях, максимальное расстояние до автомобиля примем $l_{max}=600$ метров. Интенсивность обслуживания $\mu=0,65$. Параметр α примем равным 2. Количество потенциальных заказов оценим в $\Lambda=10000$ в час.

Расчетная схема основана на том, чтобы найти неподвижную точку – p . То есть пассажиров просматривающее сервис каршеринга зависит от вероятности найти автомобиль в зоне пешей доступности. С другой стороны эта вероятность зависит от среднего количества свободных автомобилей по которым и определяется p .

Рассмотрим, как зависят от пассажиропотока и количества автомобилей в сервисе каршеринга основные характеристики: средняя загрузка автомобилей, вероятность найти свободный автомобиль в пешей доступности и доля потенциальных пассажиров просматривающих приложение сервиса.

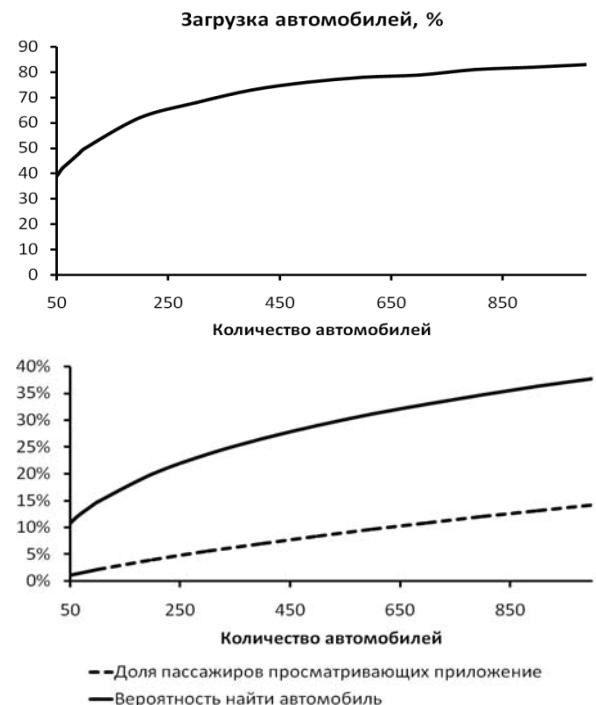


Рис. 3. Влияние количества автомобилей на спрос и их загрузку

В первую очередь отметим, что в перспективе рост количества автомобилей приводит к значительному увеличению вероятности найти свободный автомобиль с 11 до 38%. В свою очередь это привлекает дополнительных клиентов: количество пассажиров просматривающих сервис увеличивается с 1 до 14%. То есть если увеличить предложение автомобилей, то неизбежно вырастет и количество клиентов.

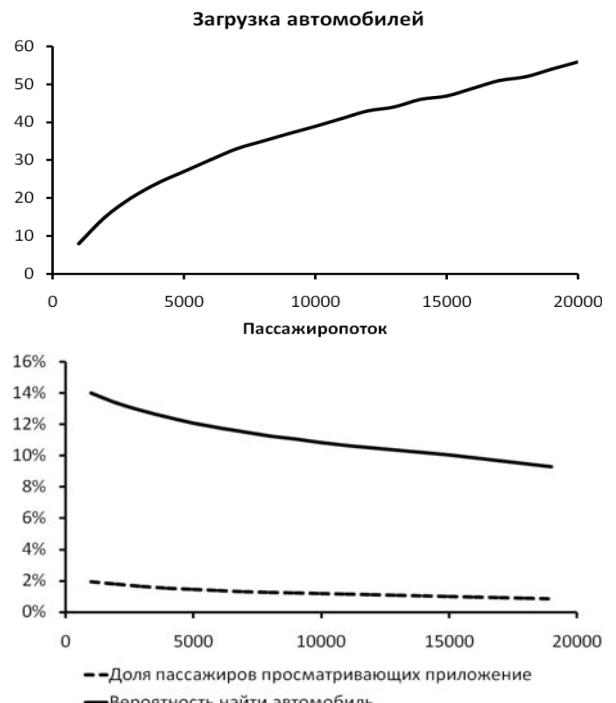


Рис. 4. Влияние интенсивности пассажиропотока на спрос и их загрузку

Исходя из улучшения качества обслуживания и стремительного роста спроса, происходит парадоксальное явление: при увеличении количества автомобилей растет их загрузка с 39 до 80%. Поэтому для повышения экономической эффективности каршеринга необходимо значительно увеличить автопарк. В 2020 году «Делимобиль» вынужден был уйти с рынка Красноярска, так как спрос оказался низким, но причиной тому послужила низкая плотность автомобилей, что привело к их низкой загрузке автомобилей.

Увеличение потенциального пассажиропотока при фиксированном количестве автомобилей приводит к тому, что снижается вероятность найти автомобиль в зоне пешей доступности, также снижается доля потенциальных клиентов, хотя общее количество клиентов растет.

Продолжая описание предыдущего рисунка, отметим, что чем больше людей, тем больше желающих воспользоваться даже низкокачественной услугой. Что и показано на рисунке рост загрузки с 9 до 56%.

Таким образом, можно констатировать, что города с высокой плотностью населения способны обеспечить загрузку даже некачественного (с низкой плотностью сети автомобилей) сервиса.

Заключение

В данной статье представлена попытка описать процесс развития каршеринга в российских городах. Предложенная математическая модель позволяет описать генерацию спроса на услуги каршеринга на основе важной характеристики – плотности свободных автомобилей.

Модель базируется на теории массового обслуживания, в частности модель передвижения автомобилей описывается как марковская многоканальная система массового обслуживания с отказами. Поиск ближайшего автомобиля основан на модели ближайшего соседа.

В качестве примера была рассмотрена информация о работе каршеринга в г. Красноярске. Город был разбит на районы, для которых анализировался спрос. Пример показал, что для города Красноярска недостаточно 50 автомобилей. Математическая модель рекомендовала значительно увеличить количество автомобилей для того чтобы удовлетворить спрос, при этом загрузка автомобилей не только не упадет, а значительно возрастет, что сделает бизнес каршеринга рентабельным.

Недостатки модели могут быть нивелированы с помощью дополнительных исследований, в частности опросов населения. Также необходимо более подробно описывать структуру населения, расположение объектов, формирование пассажиропотока в различные периоды времени и т.д. Но главным является вопрос конкуренции каршеринга с другими способами перемещения пассажиров и выработка государственной политики для регулирования и поддержки системы каршеринга, что позволит повысить качество транспортного обслуживания населения, снизит уровень автомобилизации и улучшит качество жизни в центральной части крупного города.

Литература

1. Вучик В. Транспорт в городах, удобных для жизни. Litres, 2017. 820 с.

2. Зырянова И. С. Аренда автомобилей как отрасль сервиса: географические и организационные аспекты // Региональные исследования. 2018. №. 1. С. 156-165.
3. Багров Н. С., Денисов Д. В. Задача динамического перераспределения автомобилей каршеринг-сервиса // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Т. 7. №. 8. С. 14-25.
4. Малиновский М. П., Аракелян Т. К. Каршеринг: проблемы участников и сторонних лиц // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура = Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. 2018. №. 3 (17). 13 с.
5. Chen, Tong Donna. Management of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: vehicle choice, charging infrastructure & pricing strategies. PhD dissertation. University of Texas at Austin. 2015. 120 c.
6. Boyaci B., Zografos K. G., Geroliminis N. An optimization framework for the development of efficient one-way car-sharing systems // European Journal of Operational Research. 2015. Т. 240. №. 3. С. 718-733.
7. Харитонов С. П. Метод "ближайшего соседа" для математической оценки распределения биологических объектов на плоскости и на линии // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Биология. 2005. №. 1. С. 213-221.
8. Clark P. J., Evans F. C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations // Ecology. 1954. Т. 35. №. 4. С. 445-453.
9. Берфельд М. А. Прогнозирование количества автомобилей в городской агломерации в условиях модернизации транспортной системы и социально-экономических условиях: Маг. дис. 23.04.03.68.01 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» – Сибирский федеральный университет, 2020. 86 с. http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/136812/berfeld_na_sayt.pdf?sequence=1
10. Sidorchuk R. et al. Modeling of the need for parking space in the districts of Moscow metropolis by using multivariate methods // Journal of Applied Engineering Science. 2020. Т. 18. №. 1. С. 26-39.
11. Pretenthaler F. E., Steininger K. W. From ownership to service use lifestyle: the potential of car sharing // Ecological economics. 1999. Т. 28. №. 3. С. 443-453.
12. Jorge D., Correia G. H. A., Barnhart C. Comparing optimal relocation operations with simulated relocation policies in one-way carsharing systems // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2014. Т. 15. №. 4. С. 1667-1675.
13. Jorge D., Barnhart C., de Almeida Correia G. H. Assessing the viability of enabling a round-trip carsharing system to accept one-way trips: Application to Logan Airport in Boston // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2015. Т. 56. С. 359-372.
14. Litman T. Evaluating carsharing benefits // Transportation Research Record. 2000. Т. 1702. №. 1. С. 31-35.
15. Берфельд М. А., Корягин М. Е., Катаргин В. Н. Математическое моделирование вероятности наличия автомобиля каршеринга в шаговой доступности // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 3(67). –С. 54-59. DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).54-59.
16. TDM Encyclopedia [электронный ресурс]: Why Manage Transportation Demand? URL: <https://www.vtpi.org/tdm/tdm51.htm> (дата обращения: 29.04.2021)
17. The Federal Highway Administration's [электронный ресурс]: Travel Demand Management URL: http://ops.fhwa.dot.gov/aboutus/one_pagers/demand_mgmt.htm (дата обращения: 29.04.2021)
18. Social Impact Open Repository [электронный ресурс]: URL: <http://sior.ub.edu/jspui/cris/socialimpact/socialimpact00441> (дата обращения: 29.04.2021)
19. Michael G. McNally // The four-stage model. In: A Handbook on Transport Modeling, ed. David A. Hensher and Kenneth J. Button, Elsevier, 2000. С. 35-52.

A MATHEMATICAL MODEL OF DEMAND MANAGEMENT FOR CARSHARING

Mark E. Koryagin, professor of the department of "Higher Mathematics", Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia,
markkoryagin@yandex.ru

Vladislav S. Izvekov, Lecturer of the department of "Higher Mathematics", Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia,
vlad-izvekov@mail.ru

Vladimir N. Katargin, professor, Candidate of Technical Sciences, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia,
vkatargin@sfu-kras.ru

Abstract

A significant increase of carsharing service in Russia and worldwide has led to need a formal description of the process orders fulfilling on the service. The paper presents a mathematical model for computation the distance between customers and free car, which is built on the basis of the "nearest neighbor" method. A model of demand generation is proposed. The demand depends on the potential number of customers and the probability of finding a car in the area of walking distance. The number of free cars is described as stochastic process, which is based on a birth and death process. The death intensity in the process depends on the probability of finding a car. The estimation of the average number of free cars, their average load and the probability of finding a free car in the walking distance are obtained. The combination of the presented models allows to assess the impact of the number of carsharing vehicles on demand. In particular, a numerical example shows that an increase in the carsharing fleet can lead to increasing in the cars average load. Thus, we can conclude that a larger car-sharing project can be cost-effective only if the carsharing service consists of a large fleet of vehicles, i.e. the service contains a high density of free cars.

Keywords: carsharing, the nearest neighbor method, pbirth and death process, travel demand management. urban transport system

References

1. V. Vuchik (2017). Transport in cities convenient for life. Litres. 820 p.
2. I.S. Zyryanova (2018). Car rental as a service industry: geographical and organizational aspects. *Regional studies*. No. 1. P. 156-165.
3. N.S. Bagrov, D.V. Denisov (2019). The problem of dynamic redistribution of cars of the car-sharing service. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. Vol. 7. No. 8. P. 14-25.
4. M. P. Malinovsky, T. K. Arakelyan (2018). Carsharing: problems of participants and outsiders. *Automobile. Road. Infrastructure. = Avtomobil'*. Doroga. Infrastruktura. No. 3 (17). 13 p.
5. Chen, Tong Donna (2015). Management of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: vehicle choice, charging infrastructure & pricing strategies. PhD dissertation. University of Texas at Austin. 2015. 120 p.
6. B. Boyac, K. G. Zografos, N. Geroliminis (2015). An optimization framework for the development of efficient one-way car-sharing systems. *European Journal of Operational Research*. 2015. Vol. 240. No. 3. P. 718-733.
7. S.P. Kharitonov (2005). The "nearest neighbor" method for the mathematical assessment of the distribution of biological objects on the plane and on the line. *Bulletin of the Nizhny Novgorod University. NI Lobachevsky. Series: Biology*. No. 1. P. 213-221.
8. P. J. Clark, F. C. Evans (1954). Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology*. Vol. 35. No. 4. P. 445-453.
9. M.A. Berfeld (2020). Forecasting the number of cars in urban agglomeration in the context of modernization of the transport system and socio-economic conditions: Mag. dis. 23.04.03.68.01 "Operation of transport and technological machines and complexes" Siberian Federal University, 86 p. http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/136812/berfeld_na_sayt.pdf?sequence=1
10. R. Sidorchuk et al. Modeling of the need for parking space in the districts of Moscow metropolis by using multivariate methods. *Journal of Applied Engineering Science*. 2020. Vol. 18. No. 1. P. 26-39.
11. F. E. Pretenthaler, K. W. Steininger (1999). From ownership to service use lifestyle: the potential of car sharing. *Ecological economics*. Vol. 28. No. 3. P. 443-453.
12. D. Jorge, G. H. A. Correia, C. Barnhart (2014). Comparing optimal relocation operations with simulated relocation policies in one-way carsharing systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Vol. 15. No. 4. P. 1667-1675.
13. D. Jorge, C. Barnhart, G. H. de Almeida Correia (2015). Assessing the viability of enabling a round-trip carsharing system to accept one-way trips: Application to Logan Airport in Boston. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 56 . P. 359-372.
14. T. Litman (2000). Evaluating carsharing benefits. *Transportation Research Record*. Vol. 1702. No. 1. P. 31-35.
15. M.A. Berfeld (2020), Mathematical modeling of the probability of having a car sharing within walking distance / MA Berfeld, ME Koryagin, VN Katargin // Modern technologies. System analysis. Modeling. No. 3 (67). P. 54-59. DOI 10.26731 / 1813-9108.2020.3 (67) .54-59.
16. TDM Encyclopedia [electronic resource]: Why Manage Transportation Demand? URL: <https://www.vtpi.org/tdm/tdm51.htm> (date of the application: 29.04.2021)
17. The Federal Highway Administration's [electronic resource]: Travel Demand Management URL: http://ops.fhwa.dot.gov/aboutus/one_pagers/demand_mgmt.htm (date of the application: 29.04.2021)
18. Social Impact Open Repository [electronic resource]: URL: <http://sior.ub.edu/jspui/cris/socialimpact/socialimpact00441> (date of the application: 29.04.2021)
19. Michael G. McNally// The four-stage model. In: A Handbook on Transport Modeling, ed. David A. Hensher and Kenneth J. Button, Elsevier, 2000. P. 35-52.

Information about authors:

Mark E. Koryagin, professor of the department of "Higher Mathematics", Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Vladislav S. Izvekov, Lecturer of the department of "Higher Mathematics", Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Vladimir N. Katargin, professor, Candidate of Technical Sciences, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia