УДК 656.1

© А. Д. Горбунова, аспирант
(Тюменский индустриальный университет,
Тюмень, Россия)
E-mail: gorbunovaad94@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-6-165-173

© A. D. Gorbunova, post-graduate student
(Industrial University of Tyumen,
Tyumen, Russia)
E-mail: gorbunovaad94@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ г. ТЮМЕНИ

OPTIMIZATION OF THE LOCATION OF CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES ON THE EXAMPLE OF TYUMEN

Развитие электрических транспортных средств обуславливает необходимость создания зарядной инфраструктуры, которая при небольшой численности парка требует решения задачи по оптимальному расположению ее объектов. Представлен анализ научных подходов в рассматриваемой области, что позволило одновременно с анализом особенностей функционирования зарядной инфраструктуры разработать алгоритм оптимального расположения зарядных станций в городах РФ. Для достижения результатов работы применены методы системного анализа и методы оптимального расположения социально значимых объектов. В будущем подход будет применен в алгоритме методики обоснования параметров городской зарядной инфраструктуры для электромобилей.

Ключевые слова: электромобиль, зарядная инфраструктура, модель оптимального расположения, капитальные затраты, особенности городской сети, транспортный поток, переменные решения.

The development of electric vehicles necessitates the creation of charging stations' infrastructure, which, given the small size of the fleet, requires solving the problem of the optimal location of appropriate facilities. The article presents an analysis of scientific approaches in the area under consideration, which has made it possible, simultaneously with an analysis of the features of the functioning of the charging stations' infrastructure, to develop an algorithm for the optimal location of charging stations in the cities of the Russian Federation. To achieve the results of the work, the methods of system analysis and methods of optimal location of socially significant objects were applied. In the future, the approach is going to be applied in the algorithm of the methodology for substantiating the parameters of the urban charging stations' infrastructure for electric vehicles.

Keywords: electric vehicle, charging stations' infrastructure, optimal location model, capital costs, urban network features, traffic flow, variable decisions.

Рост численности парка электрических транспортных средств является составляющей развития автомобильной промышленности. Данное значение на 1 января 2020 г. превысило 7 млн единиц. В будущем оно может достигнуть 160 млн электромобилей в мире [1, 2]. Это обусловлено активным внедрением программ повышения экологичности транспортных средств, а также стимулирования приобретения и эксплуатации электромобилей, что включает программы по развитию зарядной инфраструктуры. В конце 2018 г. численность зарядных станций в мире составила более 5 млн [3], наибольшее их количество сосредоточено в нескольких странах-лидерах [4, 5]. В большинстве стран за-

рядная инфраструктура развита неравномерно. Так, в Российской Федерации в крупнейших городах имеется развитая инфраструктура, а в более отдаленных она может совсем отсутствовать. В этом случае наблюдается следующее противоречие: при небольшом количестве эксплуатируемых электромобилей зарядные станции имеют низкий коэффициент использования и, соответственно, низкий доход, что тормозит развитие сети. Однако отсутствие развитой сети зарядных станций является препятствием для увеличения численности парка электромобилей. Согласно мнению, представленному в [6], в данном случае расположение ограниченного количества зарядных станций на территории города становится

приоритетной задачей организации рассматриваемой инфраструктуры. Это позволит снизить холостые пробеги владельцев электромобилей и увеличить спрос на зарядные станции.

Существующие алгоритмы по расположению зарядных станций на территории городов основываются на применении и комбинации подходов, предложенных М. S. Daskin для расположения социально значимых объектов на территории города, которые должны способствовать снижению перепробегов и иметь максимальный транспортный спрос [7]. Максимальный спрос достигается при их расположении зарядных станций на пересечении магистралей и дорог с учетом близлежащих узлов (на расстоянии, не превышающем максимальную дистанцию покрытия).

Для определения оптимального местоположения зарядных станций на территории городов данный подход дополняется и адаптируется к особенностям эксплуатации транспортных средств, одним из которых является необходимость парковочного пространства для стоянки во время зарядки. Эта особенность учтена в работе [8] при расположении медленных зарядных станций. Авторы предложили разделить город на несколько районов и расположить в каждом из них зарядные станции с учетом узлов максимального спроса. Однако данный подход способствует росту численности зарядных станций и повышению капитальных затрат на создание рассматриваемой инфраструктуры. Это связано с отсутствием возможности учета трудовых перемещений населения в течение дня, что приводит к дублированию в некоторых случаях зарядных станций в жилых и деловых районах города. Данная особенность разработанной модели учтена в работе [6]. Авторы создали модель, которая основывалась на данных о парковке электромобилей в ночное и дневное время. Зарядная станция устанавливалась либо в деловом, либо в жилом районе, что позволило снизить капитальные затраты на строительство зарядной инфраструктуры. Выбор одного из предполагаемых местоположений зарядной станции, а именно только у офисных центров, был представлен в работе [8]. При этом авторы предложили дополнительно расчеты численности зарядных устройств (на основе данных о количе-

стве парковочных мест и сотрудников, имеющих электромобили), а также их пешеходной доступности и затрат на установку зарядной станции и ее обслуживание.

Максимальное удовлетворение спроса владельцев электромобилей на заряд аккумуляторной батареи может быть также достигнуто в случае применения p -медианной модели. Она предполагает, что зарядные станции располагают на основании данных о затратах на путь к близлежащей зарядной станции (которые прямо пропорционально зависят от расстояния). Первоначально этот подход был применен для определения местоположения зарядных станций коммерческого транспорта [9]. Это было связано с тем, что данная модель позволяет снижать затраты на перемещение транспортных средств между зарядными станциями и пунктами назначения электромобилей-такси. В настоящее время данный подход применяется в области организации общественной зарядной инфраструктуры [10]. Он не только учитывает узлы максимального спроса и расстояние между ними, но и включает поиск местоположения, которое будет соответствовать центрам притяжения населения и минимальным затратам на путь к ближайшей зарядной станции. Однако применение представленных подходов (максимального покрытия и p -медианы) требует обязательного расчета численности зарядных станций, которые будут соответствовать минимальным эксплуатационным и капитальным затратам рассматриваемой инфраструктуры [7].

Существующие подходы к оптимальному расположению зарядных станций частично учитывают особенности расположения центров притяжения населения в городе, особенности улично-дорожной сети, распределительной электрической сети, транспортный спрос в узлах [11–15]. Но они не являются комплексным методом, который одновременно позволит учесть данные параметры и будет способствовать повышению уровня удовлетворения спроса владельцев электромобилей при ограниченной численности зарядных станций. Существующие методы не рассматривают сложность подъездного пути к зарядной станции, что может наблюдаться в городах Российской Федерации. Это также является одним из параметров, которые способ-

ствуют снижению коэффициента использования зарядной станции, о чем свидетельствуют результаты, полученные в ходе анализа данных о функционировании существующей зарядной инфраструктуры (рис. 1).

Разность долей выполняемых зарядных сессий от их общего количества между некоторыми зарядными станциями увеличивалась и составила от 17 до 40 %.

В данной статье предложен алгоритм оптимизации расположения существующих зарядных станций без изменения их типов. Влияние особенностей эксплуатации на параметры и численность зарядных станций на территории города будет рассмотрено в следующих работах.

Разрабатываемый алгоритм по оптимизации расположения объектов зарядной сети на территории городов является одним из этапов комплексной методики, которая предусматривает предварительный расчет численности зарядных станций. Этот алгоритм включает модель и ее адаптацию, которые применены для оптимизации расположения зарядных станций, поэтому их тип и количество были предварительно заданы.

Основные положения разрабатываемой модели были сформулированы в соответствии с поставленными целями и результатами анализа ранее выполненных работ в области организации зарядной инфраструктуры для электромобилей на территории городов. Они включали минимизацию:

- капитальных затрат на создание зарядной инфраструктуры;
- эксплуатационных затрат функционирующей зарядной инфраструктуры;

Рис. 1. Распределение зарядных сессий по объектам зарядной сети в Тюмени

- эксплуатационных затрат владельцев электромобилей.

Сформулированные положения были преобразованы в ходе исследования на основе результатов, полученных в ранее выполненных работах. Так, было определено, что минимальное значение затрат на установку рассматриваемого объекта достигается при его расположении вблизи крупных городских объектов, имеющих собственную трансформаторную подстанцию. При этом местоположение, которое соответствует центрам притяжения населения в некоторых случаях, способствует повышению коэффициента использования зарядной станции, снижению эксплуатационных затрат при функционировании зарядной инфраструктуры, а также снижению затрат владельцев электромобилей путем сокращения их холостых пробегов для зарядки транспортного средства. Однако при ограниченном количестве данных центры притяжения необходимо ранжировать по уровню транспортного спроса, что обуславливает необходимость применения модели максимального покрытия, или p -медианной модели.

Особенности организации дорожно-транспортной инфраструктуры в Российской Федерации в некоторых случаях не позволяют обеспечить максимальный спрос, а следовательно, максимальный коэффициент использования зарядной станции. Это обусловлено наличием сложного подъездного пути или недостаточным количеством парковочных мест, т. е. отсутствием свободного пространства для беспрепятственной зарядки электромобиля. Поэтому данные положения были дополнительными условиями разработки алгоритма.

Первый этап исследования заключался в оценке применимости модели максимального покрытия спроса и p -медианной модели в Российской Федерации на примере г. Тюмени и выявлении наиболее подходящей на основе сравнения полученных результатов.

Модель максимального покрытия спроса направлена на минимизацию времени простоя зарядных станций и увеличение коэффициента их использования, то есть количества обслуживаемых транспортных средств, или транспортного спроса h_i . Это отражено с помощью целевой функции

$$\sum_{i \in I} h_i \cdot Z_i \rightarrow \max, \quad (1)$$

где h_i — количество транспортных средств, пересекающих узел $i \in I$; Z_i — переменная решения (которая может быть равна 1 или 0: $Z_i = 1$, когда зарядная станция располагается на расстоянии, не превышающем дистанцию покрытия D_i ; $Z_i = 0$, когда зарядная станция располагается на расстоянии больше D_i).

P -медианная модель, в отличие от модели максимального покрытия, в качестве целевой функции рассматривает не максимизацию транспортного спроса в узле, а минимизацию затрат владельцев электромобилей. При этом данная модель позволяет сделать упрощение, что затраты владельцев электромобилей прямо пропорционально зависят от расстояния до ближайшей зарядной станции:

$$\sum_{i \in I} h_i \cdot d_{ij} \cdot Y_{ij} \rightarrow \min, \quad (2)$$

при условии, что $Y_{ij} = 1$,

где d_{ij} — расстояние от рассматриваемого пересечения $i \in I$ до ближайшей зарядной станции $j \in J$; Y_{ij} — переменная решения (которая может быть равна 1 или 0: $Y_{ij} = 1$, когда зарядная станция $j \in J$ используется транспортными средствами, пересекающими узел $i \in I$; $Y_{ij} = 0$, если не используется).

Применимость модели максимального покрытия и p -медианной модели определяется на основе сравнения данных о суммарном удовлетворяемом транспортном спросе, так как цель первого этапа разработки модели заключается не только в снижении эксплуатационных затрат владельцев электромобилей, но и в увеличении коэффициента использования зарядных станций, способствующего уменьшению затрат на содержание станции и увеличению ее прибыльности. Затем выбранная модель адаптируется по наличию сложных подъездных путей с помощью схемы улично-дорожной сети и особенностей организации движения транспортных средств.

Полученные результаты используются во втором этапе разработки модели и корректируются с учетом наличия близлежащих парковочных мест и трансформаторных подстанций. Это будет способствовать снижению затрат владельцев зарядной инфраструктуры на ее создание и содержание, а также повышать привлекательность зарядных станций для владельцев электромобилей. На втором этапе, как и на первом, авторами

предложено использовать переменные решения, которые позволят оценить наличие трансформаторной подстанции и снизить затраты на создание и содержание инфраструктуры C_j , а также определить вероятность наличия свободных парковочных мест P_j . Последняя переменная зависит от численности мест на парковке, так, $P_j = 0$, если количество парковочных мест не превышает 50; $P_j = 1$, если количество парковочных мест составляет от 50 до 100; $P_j = 2$, если количество парковочных мест более 100. Наличие трансформаторной подстанции оценивается достаточно просто: $C_j = 0$, если ее нет; $C_j = 1$, если трансформаторная подстанция установлена на парковке.

Предложенные переменные решения оцениваются совместно, а их значение должно стремиться к максимальному. Математически решение второго этапа разработки модели представлено формулой

$$\begin{cases} (C_j + P_j) \rightarrow \max \\ h_i \rightarrow \max \end{cases}. \quad (3)$$

В результате полученные значения позволят выявить предполагаемое расположение рассматриваемых объектов на территории города, которое будет соответствовать максимальному транспортному спросу, учитывать особенности организации движения транспортных средств и сложность подъездного пути, а также минимизировать затраты на создание и содержание станций и на холостые пробеги электромобилей для их зарядания.

Следующим этапом исследования предусмотрено совершенствование данной методики, которое будет связано с разработкой плана развертывания зарядной инфраструктуры первоначально в Тюмени, а затем в других городах Российской Федерации с учетом их природно-климатических особенностей, особенностей эксплуатируемого парка транспортных средств, а также подходов к мобильности населения, демографии. В результате разработанный алгоритм оптимизации расположения зарядных станций станет частью одной комплексной методики обоснования параметров зарядной инфраструктуры в городах РФ, которая также будет предусматривать и план развертывания рассматриваемой сети.

Рис. 3. Результат применения модели максимального покрытия

ций. Сложившаяся ситуация будет разрешена в ходе следующего этапа разработки модели при определении сложности подъездных путей, численности парковочных мест и наличия трансформаторных подстанций.

Большая плотность зарядных станций в центральной части города также наблюдается и при построении p -медианной модели. Однако в данном случае некоторые объекты расположены на более удаленных участках от центра города, что позволяет увеличить покрываемый транспортный спрос (рис. 4).

Как ранее было указано, наличие точек в более отдаленных от центра узлах улично-дорожной сети способствует увеличению величины покрываемого спроса. В результате модель максимального покрытия спроса позволяет обеспечить доступными зарядными станциями только 41,813 транспортного средства/час, а p -медианная модель — 44,538 транспортного средства/час. Это максимально возможная численность транспортных средств, которые пересекают узлы, выбранные для размещения зарядных станций (так как вероятность пребывания электромобилей

в узлах транспортной сети зависит от величины транспортного потока в них [7]). Сравнительная оценка данных величин показала, что в дальнейшем для разработки модели будет применена p -медианная модель.

Согласно схеме создания модели, на следующем этапе полученные результаты были оценены на наличие сложных подъездных путей в соответствии с особенностями организации дорожного движения (рис. 5).

Данное решение должно способствовать максимизации коэффициента использования объектов и снижению холостых пробегов владельцев электромобилей, но оно требует обеспечения свободного парковочного места.

Таким образом, анализ предыдущих исследований и оценка их преимуществ и недостатков позволили в ходе исследования разработать комплексный подход к оптимальному расположению зарядных станций на территории города, который в качестве дополнительных параметров учитывает вероятность наличия свободного парковочного места в предполагаемом местоположении зарядной станции, а также сложность

Рис. 4. Результаты применения p -медианной модели

Рис. 5. Рассчитанное расположение зарядных станций в Тюмени

подъездного пути к ней, что до настоящего времени не учитывалось.

Благодарности. Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования, контракт № 0825-2020-0014.

Библиографический список

1. Calise F., Cappiello F., Carteni A., d'Accadia M., Vicidomini M. A novel paradigm for a sustainable mobility based on electric vehicle, photovoltaic panels and electric energy storage systems: Case studies for Naples and Salerno (Italy) // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. № 11. Pp. 97–114.
2. Leurent F., Windisch E. Triggering the development of electric mobility: a review of public policies // *Europe Transportation Research Review*. 2011. № 3. Pp. 221–235.
3. Pieriegud J. E-mobility on-demand in the central and eastern European countries: current trends, barriers and opportunities // *Transportation Economics and Logistics*. 2019. № 1. Pp. 268–281.
4. Rietmann N., Lieven T. How policy measures succeeded to promote electric mobility – Worldwide review and outlook // *Journal of Cleaner Production*. 2019. № 2. Pp. 66–75.
5. Chen L., Wu Z. Study on the effects of EV charging to global load characteristics via charging aggregators // *Energy Procedia*. 2018. № 145. Pp. 175–180.
6. Gimenez-Gaydou D. A., Ribeiro A. N., Gutierrea J., Antunes A. P. Optimal location of battery electric vehicle charging stations in urban areas: A new approach // *International Journal of Sustainable Transportation*. 2016. № 10. Pp. 393–405.
7. Daskin M. S. *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. 2nd ed. Wiley, 2013. 544 p.
8. Frade I., Ribeiro A., Goncalves G. A., Antunes A. P. Optimal location of charging stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon, Portugal // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2011. № 1. Pp. 91–98.
9. Ghamami M., Nie Y., Zockaie A. Planning charging infrastructure for plug-in electric vehicles in city canters // *International Journal of Sustainable Transportation*. 2016. № 10. Pp. 343–353.
10. Ko J., Shim J. S. Locating battery exchange stations for electric taxis: a case study of Seoul, South Korea // *International Journal of Sustainable Transportation*. 2016. № 10. Pp. 139–146.
11. He S., Kuo Y., Wu D. Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the optimal locations of public electric vehicle charging facilities: A case study

of Beijing, China // *Transportation Research Part C*. 2016. № 67. Pp. 131–148.

12. Chen C., Hua G. A new model for optimal deployment of electric vehicle charging and battery swapping stations // *International Journal of Control and Automation*. 2014. № 7. Pp. 247–258.

13. Wolbertus R., Hoed R. Electric vehicle fast charging needs in cities and along corridors // *World Electric Vehicle Journal*. 2019. № 10. Pp. 45–54.

14. Wang Y., Lin C. Locating multiple types of recharging stations for battery-powered electric vehicle transport // *Transportation Research Part E*. 2013. № 58. Pp. 76–87.

15. Mak H., Rong Y., Shen Z. Infrastructure planning for electric vehicles with battery swapping // *Management science*. 2013. № 59. Pp. 1557–1575.

References

1. Calise F., et al. A novel paradigm for a sustainable mobility based on electric vehicle, photovoltaic panels and electric energy storage systems: Case studies for Naples and Salerno (Italy). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, no. 11, pp. 97–114.
2. Leurent F., Windisch E. Triggering the development of electric mobility: a review of public policies. *Europe Transportation Research Review*, 2011, no. 3, pp. 221–235.
3. Pieriegud J. E-mobility on-demand in the central and eastern European countries: current trends, barriers and opportunities. *Transportation Economics and Logistics*, 2019, no. 1, pp. 268–281.
4. Rietmann N., Lieven T. How policy measures succeeded to promote electric mobility – Worldwide review and outlook. *Journal of Cleaner Production*, 2019, no. 2, pp. 66–75.
5. Chen L., Wu Z. Study on the effects of EV charging to global load characteristics via charging aggregators. *Energy Procedia*, 2018, no. 145, pp. 175–180.
6. Gimenez-Gaydou D. A., Ribeiro A. N., Gutierrea J., Antunes A. P. Optimal location of battery electric vehicle charging stations in urban areas: A new approach. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2016, no. 10, pp. 393–405.
7. Daskin M. S. *Network and discrete location: models, algorithms, and applications*. 2nd ed. Wiley Publ., 2013, 544 p.
8. Frade I., Ribeiro A., Goncalves G. A., Antunes A. P. Optimal location of charging stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon, Portugal. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2011, no. 1, pp. 91–98.
9. Ghamami M., Nie Y., Zockaie A. Planning charging infrastructure for plug-in electric vehicles in city canters.

International Journal of Sustainable Transportation, 2016, no. 10, pp. 343–353.

10. Ko J., Shim J. S. Locating battery exchange stations for electric taxis: a case study of Seoul, South Korea. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2016, no. 10, pp. 139–146.

11. He S., Kuo Y., Wu D. Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the optimal locations of public electric vehicle charging facilities: A case study of Beijing, China. *Transportation Research Part C*, 2016, no. 67, pp. 131–148.

12. Chen C., Hua G. A new model for optimal deployment of electric vehicle charging and battery

swapping stations. *International Journal of Control and Automation*, 2014, no. 7, pp. 247–258.

13. Wolbertus R., Hoed R. Electric vehicle fast charging needs in cities and along corridors. *World Electric Vehicle Journal*, 2019, no. 10, pp. 45–54.

14. Wang Y., Lin C. Locating multiple types of recharging stations for battery-powered electric vehicle transport. *Transportation Research Part E*, 2013, no. 58, pp. 76–87.

15. Mak H., Rong Y., Shen Z. Infrastructure planning for electric vehicles with battery swapping. *Management science*, 2013, no. 59, pp. 1557–1575.