

## Моделирование внедрения электрических автобусов в городскую транспортную систему на примере Москвы

Заявка № 1680472

При формировании политики в сфере общественного транспорта, включающей создание транспортных сетей и их финансирование из бюджетных средств, актуальной является проблема оценки эффективности существующих транспортных систем. Соотношение издержек на содержание инфраструктуры и способность удовлетворять транспортный спрос варьируется в зависимости от вида транспортного средства. Существенным параметром является масштабируемость различных типов общественного транспорта: транспортные средства с меньшей вместимостью характеризуются относительно низкими капитальными и эксплуатационными затратами, однако демонстрируют ограниченную способность к обслуживанию существующего спроса на перемещение и недостаточную гибкость к обеспечению транспортных потребностей в перспективе [Coulombel N., 2023], т.к. из-за увеличения спроса на транспорт возникает проблема перегруженности дорог, что приводит к пробкам и, соответственно, снижению транспортных возможностей по всей сети. Исследования фиксируют тенденцию к постоянной трансформации транспортной инфраструктуры, заключающуюся, например, в полном запрете мелкорейсового такси «jitney» в развитых странах, поскольку данный вид транспорта создаёт нагрузку на городские дороги, приводящую к пробкам, при этом обеспечивая крайне малое удовлетворение спроса на перевозки пассажиров, который намного дешевле и эффективнее обслужили бы автобусы [Gholami A. et. al., 2014].

Некоторые исследования [Tirachini A. et. al., 2010] рассматривают сопоставление эффективности автобусного и рельсового транспорта, где находится, что трамваи более выгодное решение для транспортировки пассажиров, если их скорость превышает автобусный на 5 км/ч, а железнодорожный транспорт эффективнее, если его скорость превышает автобусный на 9 км/ч и спрос более 2 миллионов пассажиров/ч (автобусный транспорт становится дешевле автомобильного транспорта при спросе на него от 30,000 пассажиров/ч [Allport R. J., 1981]). Таким образом, автобусы являются дешевле с точки зрения операционных расходов для удовлетворения спроса на общественный транспорт, особенно для развивающихся городов без существующей рельсовой сети, поскольку автобусное сообщение использует инфраструктуру, предназначенную для личного автотранспорта, но обеспечивая большие объёмы пассажироперевозок.

Развитие в области общественного транспорта выражается в использовании более современных источников топлива, которые возобновляемые и не загрязняют атмосферу. Это особенно важно для крупных городов, где высокая плотность населения. Так, например, ожидается рост электрификации автобусных сетей в будущем благодаря значительным экологическим преимуществам электричества над дизелем [Perumal S. S. G. et. al., 2022], однако электрические автобусы имеют уникальные ограничения, которые требуют разработку нового подхода к планированию транспортных сетей. Длительное время зарядки и малый запас хода делают электробусы менее гибкими и универсальными, чем дизельные аналоги. Для обслуживания того же количества маршрутов при сохранении прежней инфраструктуры, т.е. при том же количестве и расположении заправочных станций, которые для электробусов являются зарядными, потребуется значительно большее количество транспортных единиц. При этом сам электробус дороже как в приобретении, так и в обслуживании. Неочевидно, является ли экологический эффект от внедрения электробусов достаточным, чтобы оправдать такой рост затрат. В связи с этим требуется оптимизация

новой транспортной системы с учетом всех ограничений, свойственных электрическому транспорту.

В рамках исследования данной проблемы встречается построение VRP (vehicle routing problem) моделей через различные методы, например, через машинное обучение и построение модели целочисленного программирования. Один из важных видов формулировок этой задачи заключается в оптимизации соблюдения маршрутов, где большинство переменных модели измеряются через дискретное время [Gkiotsalitis K. et al., 2023], в результате чего можно найти график работы каждого автобуса с минимальными операционными расходами в сети. В статье [van Kooten Niekerk M. E. et al., 2017] нашли, что не существует допустимого решения (невозможно обслужить все маршруты), если оптимизировать исполнение маршрутов электробусами так же, как и дизельными автобусами. Авторы находят решение только при добавлении дополнительных единиц техники в модель. Задача данного исследования заключается в нахождении такого подхода при построении автобусной сети, чтобы минимизировать число единиц техники и операционные расходы в транспортной сети, меняя конфигурации и число зарядных станций.

Для проведения исследования была построена модель линейного целочисленного программирования на основе [de Armas J. et al., 2015, Garaix T. et al., 2018], используя данные о фиксированных маршрутах (время начала, длительность каждого маршрута, матрица дистанции маршрутов друг от друга и от автобусных парков) и характеристиках автобусов (пробег от одного заряда/одной заправки, скорость зарядки/заправки). Предпосылка модели заключается в том, что существующие автобусные маршруты составлены с учетом необходимого пассажирского потока и с оптимальным количеством пересечением между различными маршрутами. Задача тогда состоит в том, чтобы найти издержки от обслуживания всех маршрутов в одной сети (в рамках одного автобусного парка). Основным результатом исследования является формулировка данной MILP-модели, которая оптимизирует эти издержки, и выдает набор данных, в которых содержится наиболее эффективное число транспортных единиц и оптимальный график работы каждой из них. На основе этих результатов можно впоследствии выявить наиболее оптимальную конфигурацию электробусного парка, зарядной инфраструктуры и их взаимное расположение в рамках транспортной сети. В модель включены дополнительные переменные, аналогичные [Garaix T. et al., 2018], которые позволяют автобусам опаздывать и пропускать маршруты. Также проведена проверка валидности выводов модели через сопоставление результатов с существующими автобусными транспортными сетями в крупных городах, таких как Москва.

В последующем на основе результатов модели будет проведен анализ чувствительности, чтобы выявить такие характеристики электробусов (например, емкость батареи, скорость зарядки), которые больше всего влияют на издержки от их применения. Также будет проведен анализ готовности автобусов опаздывать на маршруты и пропускать их при различных соотношениях издержек на эти действия и стоимости операционных расходов. На основе полученных результатов будет сформирован пакет практических рекомендаций по развитию инфраструктуры для городов Российской Федерации, планирующих переход на электротранспорт.

### Источники и литература

- 1) Allport R. J. The costing of bus, light rail transit and metro public transport systems //Traffic Engineering & Control. – 1981. – Т. 22. – №. HS-032 837.
- 2) Coulombel N., Monchambert G. Diseconomies of scale and subsidies in urban public transportation //Journal of Public Economics. – 2023. – Т. 223. – С. 104903.

- 3) de Armas J. et al. A hybrid GRASP-VNS for ship routing and scheduling problem with discretized time windows //Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2015. – Т. 45. – С. 350-360.\
- 4) Garaix T. et al. Workforce scheduling linear programming formulation //IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Т. 51. – №. 11. – С. 264-269.
- 5) Gholami, A., Taghizadeh, Y., & Tian, Z. (2014). Classification of taxi khattee (jitney) lines based on topography and line cost indices. Transportation Research, Part A: Policy and Practice, 59, 239-249.
- 6) Gkiotsalitis K., Iliopoulou C., Kepaptsoglou K. An exact approach for the multi-depot electric bus scheduling problem with time windows //European Journal of Operational Research. – 2023. – Т. 306. – №. 1. – С. 189-206.
- 7) Perumal S. S. G., Lusby R. M., Larsen J. Electric bus planning & scheduling: A review of related problems and methodologies //European Journal of Operational Research. – 2022. – Т. 301. – №. 2. – С. 395-413.
- 8) Tirachini A., Hensher D. A., Jara-Díaz S. R. Comparing operator and users costs of light rail, heavy rail and bus rapid transit over a radial public transport network //Research in transportation economics. – 2010. – Т. 29. – №. 1. – С. 231-242.
- 9) van Kooten Niekerk M. E., Van den Akker J. M., Hoogeveen J. A. Scheduling electric vehicles //Public Transport. – 2017. – Т. 9. – №.1. – С. 155-176.