

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО РЕГУЛЯРНОГО ГОРОДСКОГО МАРШРУТА ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОБУСА

А.Д. Горбунова, О.Ю. Смирнова
Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье представлен анализ научных работ по эксплуатации безрельсовых транспортных средств общего пользования с электрическим приводом. Электробусы прошли тестирование в крупных мегаполисах, и, несмотря на преимущества, были выявлены проблемы в выборе типа зарядки, технологических особенностей и с наличием и эксплуатацией зарядной инфраструктуры. Процесс эксплуатации сопровождается рядом технических ограничений, которые на практике затрудняют выбор маршрутов для эксплуатации электробусов. Целью исследования является разработка алгоритма выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробусов и проверка его на примере маршрутной сети г. Тюмени.

Материалы и методы. Сформирована структурно-логическая схема факторов, влияющих на выбор маршрута для эксплуатации электробуса. В результате обработки экспертных оценок выявлены наиболее существенные факторы. На основе теории системного анализа выявлена схема взаимосвязей данных факторов, сформулированы ограничения для алгоритма. Разработан алгоритм выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса, на основе которого построена имитационная модель.

Результаты. Сформирована схема факторов, оказывающих влияние на выбор рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса с учетом их взаимных связей. Разработан алгоритм и имитационная модель выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса. Выполнена оценка нескольких городских маршрутов в г. Тюмени на предмет рациональности ввода электробусов.

Обсуждение и заключение. Оценка пяти регулярных городских маршрутов в г. Тюмени с помощью разработанного алгоритма и имитационной модели позволила выявить три рациональных маршрута, а также показала нерациональность двух других, что было обусловлено несоответствием продолжительности зарядной сессии и перерывов в работе и недостаточным уровнем заряда тяговой аккумуляторной батареи для обеспечения требуемого автономного хода транспортного средства. В ходе продолжения данных исследований будет разработан дополнительно алгоритм экономической оценки маршрутов для эксплуатации электробусов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электробус, зарядная станция, рациональный регулярный городской маршрут, зарядная инфраструктура, выбор маршрута, алгоритм.

Поступила 08.07.21, принята к публикации 31.08.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Горбунова, А.Д. Разработка алгоритма выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса / А.Д. Горбунова, О.Ю. Смирнова. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-378-389> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 4(80). – С. 378-389.

© Горбунова А.Д., Смирнова О.Ю., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-378-389>

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM FOR SELECTING A RATIONAL REGULAR URBAN ROUTE FOR ELECTRIC BUS OPERATION

Anastasia D. Gorbunova, Olga Yu. Smirnova
Industrial University of Tyumen,
Tyumen, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article presents an analysis of researches on the operation of public transport vehicles with an electric drive. Electric buses have been tested in megacities, and despite the advantages, problems were identified both in the selection of the charging type, technological features and with the availability and operation of the charging infrastructure. The operation process is associated with a number of technical restrictions, which in practice make it difficult to select routes for the electric bus operation. The aim of the study is to develop an algorithm for selecting a rational regular urban route for the electric bus operation and to test it on the example of the route network of Tyumen.

Materials and methods. A structural diagram of the factors influencing the selection of the route for the electric bus operation has been formed. As a result of processing expert assessments, the most significant factors were identified. The diagram of the interconnections of these factors is identified and limitations for the algorithm are formulated based on the theory of systems analysis. The algorithm for selecting the rational regular urban route for the electric bus operation has been developed. It enables creating the simulation model for selecting a rational regular urban route for the operation of an electric bus.

Results. The diagram of factors influencing the selection of a rational regular urban route for the operation of an electric bus, taking into account their mutual relations, has been formed. The algorithm and simulation model for selecting a rational regular urban route for the operation of an electric bus has been developed. Several urban routes in Tyumen were assessed for the rationality of the introduction of electric buses.

Discussion and conclusions. Evaluation of five regular urban routes in Tyumen using the developed algorithm and the simulation model revealed three rational routes, and also showed the inefficiency of the other two. It due to the discrepancy between the duration of the charging session and breaks in operation, as well as the insufficient charge level of the traction battery to ensure the required autonomous movement of the vehicle. In the course of the continuation of these studies, the developed algorithm will be supplemented with the stage of economic assessment of routes for the operation of electric buses.

KEYWORDS: electric bus, charging station, rational regular urban route, charging infrastructure, selection of route, algorithm

Submitted 08.07.21, revised 31.08.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Gorbunova A.D., Smirnova O.Yu. Development of the algorithm for selecting a rational regular urban route for electric bus operation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (4): 378-389. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-378-389>.

© Gorbunova A.D., Smirnova O.Yu., 2021



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение экологичности транспортных средств является одним из направлений развития автотранспортной отрасли, что отражено в транспортной стратегии РФ на период до 2030 г. и в стратегии развития автомобильной промышленности РФ на период до 2025 г. При этом в качестве мирового тренда, который оказывает существенное влияние на выбор вида используемого топлива и энергии для движения, рассматривается электрический двигатель. В мире численность электрических транспортных средств на конец 2020 г. превысила 10 млн ед. А согласно прогнозам аналитических агентств к 2030 г. данный парк может достигнуть 145 млн ед.

Активный ввод в эксплуатацию транспортных средств на электрической тяге наблюдается не только на уровне индивидуального транспорта, но и активно используется на общественном. Так, согласно отчету аналитического агентства Bloomberg, на конец 2018 г. численность электробусов в мире превысила 450 тыс. ед., а к 2025 г. их количество должно вырасти до 630 тыс. ед. В Российской Федерации в крупнейших городах, а именно в г. Москве и в г. Санкт-Петербурге, активно вводятся в эксплуатацию электробусы. К концу 2020 г. численность электробусов, обслуживающих населения на 45 регулярных городских маршрутах, в г. Москве достигла 605 ед.

Эксплуатация электрических транспортных средств на маршруте способствует повышению экологичности подвижного состава. Согласно социальному стандарту транспортного обслуживания населения автомобильным и наземным электрическим транспортным экологический класс транспортных средств является показателем качества транспортного обслуживания. Это обуславливает необходимость распространения электробусов. Однако современные транспортные средства на электрической тяге имеют ряд технических ограничений: запас хода, продолжительность восстановления заряда тяговой аккумуляторной батареи, изменение данных параметров при понижении температуры окружающего воздуха. Это одновременно с их высокой стоимостью и отсутствием зарядной инфраструктуры приводит к снижению темпов распространения в регионах. По состоянию на июнь 2021 г. данные транспортные средства эксплуатируются в регионах в ограниченном количестве, как правило 1-2 электробуса в одном

городе. При этом эксперты отмечают сложность выбора рационального маршрута на практике с учетом технических и технологических ограничений данных транспортных средств.

Современные исследования, рассматривающие эксплуатацию электробусов, как правило, направлены на подбор зарядной инфраструктуры для данных транспортных средств в соответствии с особенностями маршрута (скорость движения, количество остановочных пунктов и время простоя на них, длина перегонов, количество поворотов, загрузка транспортных средств, уклон дороги и др.) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]; изучение мер стимулирования для эксплуатации электробусов [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]; разработку ездового цикла, способствующего снижению расхода электроэнергии из тяговой батареи, а также выбор режима эксплуатации тяговой аккумуляторной батареи для увеличения ее ресурса¹ [20].

Влияние зарядной инфраструктуры на функционирование электробусов рассматривается как одна из наиболее важных составляющих при их эксплуатации, что обусловлено техническими ограничениями данных транспортных средств. Её рациональное планирование способствует снижению затрат на электроэнергию и отсутствию сбоев в их работе, что может быть связано со значительной продолжительностью восстановления заряда тяговой батареи [1]. Вероятность снижения частоты обслуживания населения при эксплуатации электробусов отмечена в работах [2, 3]. Подбор зарядной инфраструктуры, как правило, осуществляется в несколько этапов: исследование особенностей функционирования транспортных средств на маршруте и оценка потребления энергии; проверка технической реализуемости архитектур и определения размеров бортового хранилища; сравнение реализуемых решений с экономической точки зрения [1]. В качестве важных факторов, оказывающих влияние на количество потребленной энергии при движении по маршруту, авторы [1] выделяют коэффициент загрузки автобуса, его среднюю скорость и средний уклон дороги. Однако Fusco G., Alessandrini A. и др. отмечают существенное влияние на расход электрической энергии на маршруте: его длину, частоту движения транспортных средств, а также время простоя на промежуточных и конечных остановочных пунктах [2, 3, 4, 5, 6, 7]. Данные закономерности разрабатываются и позволяют оценить суммарное количество энергопотребления в городах при переходе к

¹ Назаров А.А. Разработка комплекса мероприятий по совершенствованию функционирования городских автобусов на основе учета сложности маршрута движения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Андрей Анатольевич Назаров. М., 2006.

эксплуатации электробусов на одном отдельном маршруте либо в целом в городе [8, 9]. Но не рассматривают подходы, направленные на увеличение численности парка электробусов, а соответственно, рост количества обслуживаемых городских маршрутов. Данные методы представлены в работах [10, 11, 12]. В этом случае авторы отмечают важность четкости стратегического планирования и эффективности взаимодействия компаний перевозчиков и органов местного самоуправления при принятии решений по эксплуатации электробусов. Однако подобные исследования рассматривают только социально-экономические методы регулирования без учета технической возможности реализации мероприятий. Проблемы поэтапного перехода к эксплуатации электробусов представлены в работах [13, 14, 15, 16]. Их решение основывается на разработке программ смешанно-целочисленного моделирования, многоцелевой оптимизации и методах аналитического иерархического процесса с учетом минимизации затрат, возникающих при эксплуатации электробусов. При этом авторы учитывают не только технические характеристики транспортных средств, но и соответствие расписанию движения на маршруте.

Важность поэтапного перехода к эксплуатации электробусов отмечена в работах [17, 18, 19]. Это обусловлено высокими капитальными затратами на организацию зарядной инфраструктуры и покупку электробусов для обслуживания населения по всем существующим маршрутам сети (от 28,5 до 34,1 млн руб. при обслуживании маршрута протяженностью 10 км одним электробусом). В этом случае возникает необходимость выбора рационального маршрута для эксплуатации электробуса с учетом всех существующих его ограничений: наличия свободных парковочных мест для стоянки транспортных средств во время зарядной сессии, особенностей расписания движения автобусов и режима труда и отдыха водителей, параметров маршрута и др. В настоящее время Krawiec K. предложил иерархическую модель развертывания парка электробусов, которая рассматривает выбор маршрута для поэтапного ввода электробусов [17]. Она основывается на модели графов сети общественного транспорта, существующего расписания и модели состояния батарей электробуса, рассматривающих

потребление энергии с помощью линейной модели, заданной однозначно. Однако согласно работ [20] данная величина зависит от множества факторов, из которых существенное влияние оказывает скорость движения, время простоя на промежуточных остановочных пунктах, их количество, загрузка транспортного средства. При этом организация зарядной инфраструктуры требует наличия свободной территории для организации парковочного места автобуса во время зарядной сессии, что может оказать существенное влияние на выбор маршрута для эксплуатации электробуса в крупном городе с плотной застройкой. Это обуславливает необходимость расширения данной области исследования. Целью исследования является разработка алгоритма выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробусов и его проверка на примере маршрутной сети г. Тюмени.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- выявить существенно важные факторы, которые будут включены в алгоритм;
- выявить и сформулировать ограничения, возникающие в ходе эксплуатации электробуса на регулярном городском маршруте;
- разработать алгоритм выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса;
- выполнить верификацию разработанного алгоритма.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе анализа ранее выполненных работ было установлено, что существующие подходы к выбору маршрута электробуса не учитывают полного перечня факторов, влияющих на эксплуатацию данных транспортных средств. Данный перечень был составлен на основе анализа работ, которые были представлены ранее [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], а также дополнительного изучения исследований, направленных на рациональное распределение подвижного состава по маршрутной сети. В результате в качестве факторов, которые выделяют авторы работ^{2,3}, были выявлены количество поворотов, светофоров на маршруте, наличие повышенных требований к экологичности транспортных средств, взаимное наложение маршрутов.

² Черняева В.А. Комплексное обоснование выбора систем городского пассажирского общественного транспорта: автореф. дис. ... канд. техн. наук/ Виктория Андреевна Черняева. СПб., 2014.

³ Фомин Е.В. Повышение качества обслуживания пассажиров городского транспорта путем оптимизации структуры парка подвижного состава: автореф. дис. ...канд. техн. наук/ Евгений Валерьевич Фомин. Красноярск., 2018.

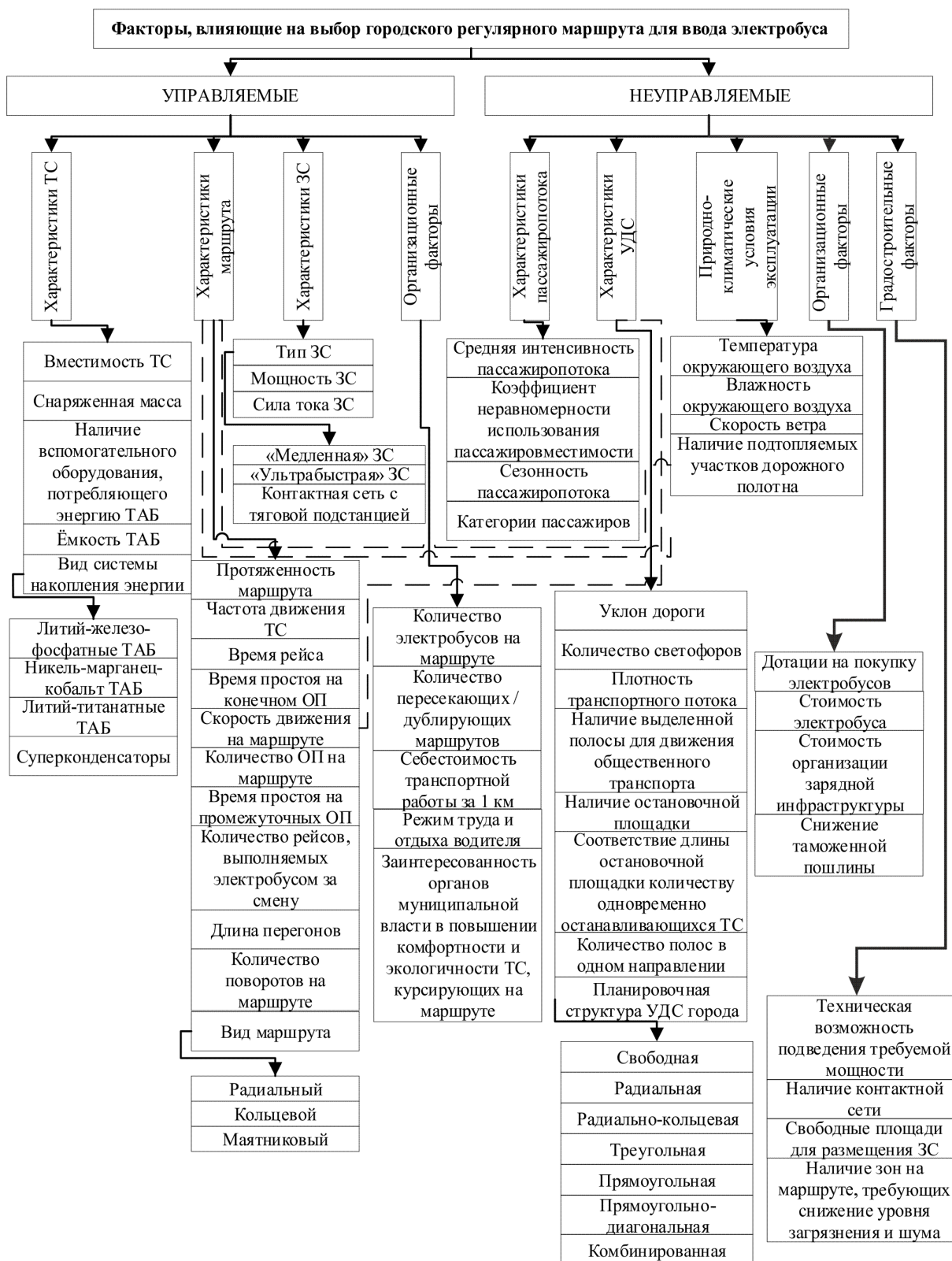


Рисунок 1 – Структурная схема факторов, влияющих на выбор регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса

Fig. 1 – Structural diagram of factors influencing on the selection of a regular urban route for an electric bus operation

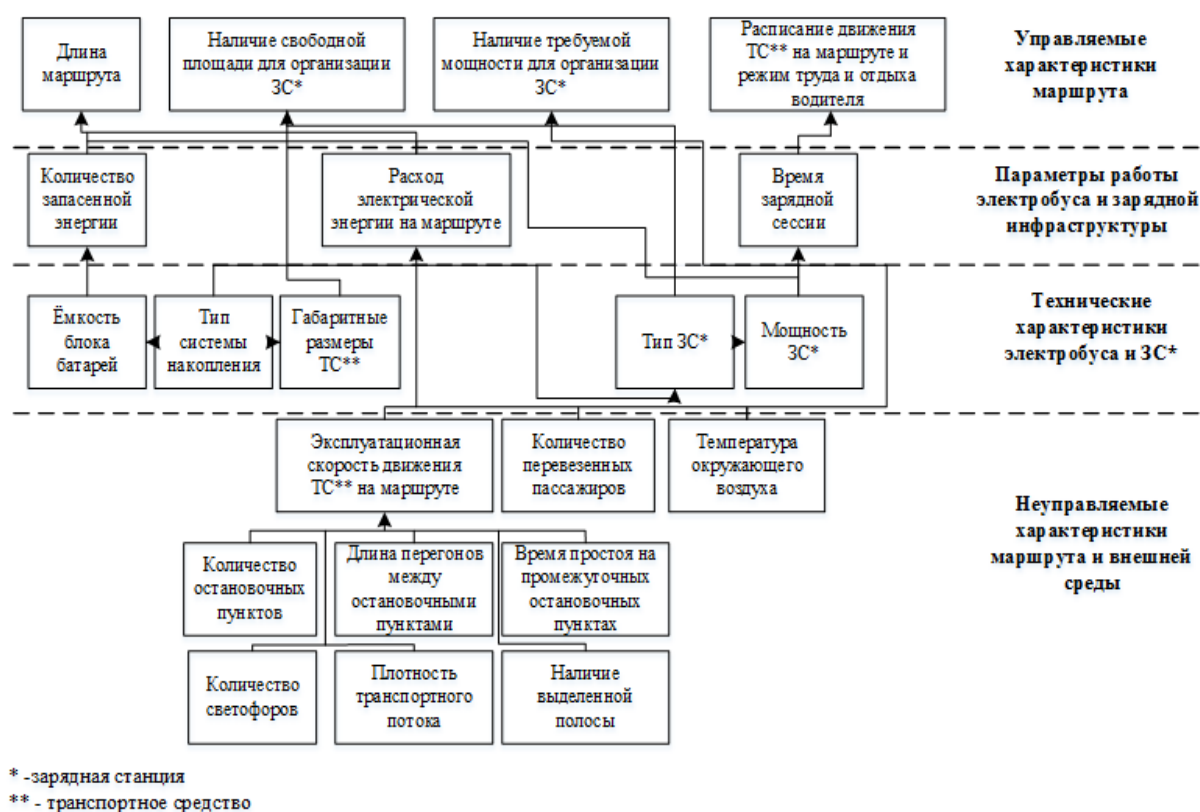


Рисунок 2 – Схема взаимного влияния факторов на выбор рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса

Fig. 2 – Diagram of the mutual influence of factors on the selection of a rational regular urban route for an electric bus operation

Поэтому первоначально в ходе проведения исследования была разработана структурная схема факторов, оказывающих влияние на выбор рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса, что представлено на рисунке 1.

В результате экспертной оценки предложено более 40 факторов, были выбраны наиболее весомые из них и составлена схема их взаимосвязей, которая представлена на рисунке 2.

Выбор рационального маршрута с учетом данных факторов требует формулировки некоторых ограничений, в частности расстояние автономного пробега строго ограничено емкостью тяговой аккумуляторной батареи и расходом электрической энергии. Поэтому для разработки ограничений были дополнительно изучены и проанализированы нормативно-правовые акты в области организации пассажирских перевозок автомобильным транспортом, а также исследования, рассматривающие эксплуатацию электрических транспортных средств.

Одним из основных ограничений, оказывающих влияние на выбор рационального маршрута для эксплуатации электробуса, является наличие свободных парковочных мест, позволяющих организовать место для отстоя транспортных средств во время заряда тяговой аккумуляторной батареи. Это обусловлено тем, что электробус во время зарядной сессии, продолжительность которой может составлять от 6 до 20 мин в среднем, не должен препятствовать движению и остановке для посадки и высадки пассажиров других транспортных средств. Согласно своду правил «Требования к элементам улично-дорожной сети населенных пунктов» (2018 г.) площадь одного парковочного места для автобуса должна составлять от 72 до 118 м² в зависимости от способа его организации.

Технические характеристики электробусов и особенности их эксплуатации также оказывают влияние на выбор рационального маршрута. В этом случае основным ограничением является емкость тяговой аккумуляторной батареи, которая может изменяться от 15 до 250 кВт*ч [21].

Таблица 1
Ограничения в алгоритме выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса

Table 1
Limitations in the algorithm for selecting a rational regular urban route for an electric bus operation

№п/п	Ограничения
1	График движения автобусов остается неизменным при эксплуатации электробусов
2	Сохранение режима труда и отдыха водителей при эксплуатации электробусов
3	Наличие парковочного места площадью от 72 до 118 м ² для отстоя электробусов во время зарядной сессии
4	Изменение заряда тяговой батареи во время движения электробуса по маршруту должно находиться в диапазоне от 30 до 80%. При этом для выполнения зарядной сессии, способствующей ресурсосбережению тяговой аккумуляторной батареи, уровень заряда тяговой аккумуляторной батареи для следующей зарядной сессии не должен превышать 60%
5	При выезде с транспортного предприятия заряд тяговой аккумуляторной батареи составляет 100%

Однако данное значение не является предельной величиной, так как их полный разряд приводит к снижению ресурса их эксплуатации. В работе И. К. Масленникова⁴ экспериментальным путем установлено, что для сохранения ресурса тяговых аккумуляторных батарей уровень заряда их следует поддерживать в диапазоне от 30 до 80%. Однако верхнее значение данного диапазона соответствует желаемому максимальному уровню заряда батареи на маршруте. При дальнейшем движении по маршруту данное значение должно снижаться и для выполнения зарядной сессии, при которой температура нагрева тяговой аккумуляторной батареи не превышала допустимых значений, уровень заряда тяговой батареи не должен превышать 60%. При этом данная емкость аккумуляторной батареи должна обеспечивать такой автономный пробег транспортного средства, чтобы соответствовать расписанию движения автобусов на маршруте с учетом требований по режиму труда и отдыха водителей. Это является еще одним из ограничений при выборе рационального маршрута для эксплуатации электробуса. Согласно приказу Минтранса России от 16.10.2020 №424 время непрерывного управления транспортным средством должно ограничиваться 4 ч 30 мин, по окончании данного времени следует делать перерыв не менее 45 мин. Данный перерыв может быть разделен на несколько, при этом каждая часть не должна составлять менее 10 мин. Эти специальные перерывы могут быть использованы в качестве времени заряда тяговых аккумуляторных батарей так же, как и

перерыв для отдыха и питания, который должен составлять от 30 мин до 2 ч в середины смены. Данные перерывы могут быть использованы только в том случае, если продолжительность зарядной сессии не превышает его длительность. Данные ограничения обусловлены тем, что при эксплуатации электробуса на маршруте организация дополнительных перерывов для восстановления заряда тяговых аккумуляторных батарей или увеличение продолжительности специальных перерывов может привести к изменению частоты обслуживания населения, что также является одним из показателей качества оказываемых услуг. Все ограничения, сформулированные в ходе разработки алгоритма, представлены в таблице 1.

График движения транспортных средств и режим труда и отдыха водителей в алгоритме авторами предложено учитывать как совокупность блоков «движение-перерыв». Их количество в расписании будет задавать численность циклов в расчете. При этом факторы, оказывающие влияние на расход электроэнергии электробусом на маршруте, были сгруппированы по природе их воздействия, а именно такие факторы, как количество остановочных пунктов, время простоя на них и длина перегонов между ними учтены в эксплуатационной скорости движения транспортных средств на маршруте. Расположение зарядных станций на маршруте учитывается с помощью измерения расстояния между ними и расчетного количества энергии, требуемого для преодоления его и основанного на измерении нормы расхода электрической энергии на маршруте.

⁴ Масленников И.К., Карпунин К.Е., Климов А.В., Оспанбеков Б.К. Исследование эксплуатационных показателей тягового электрооборудования электробуса в городских условиях движения // Сборник трудов конференции «Технологии и компоненты наземных интеллектуальных транспортных систем». НАМИ. 2019. С. 377–384.

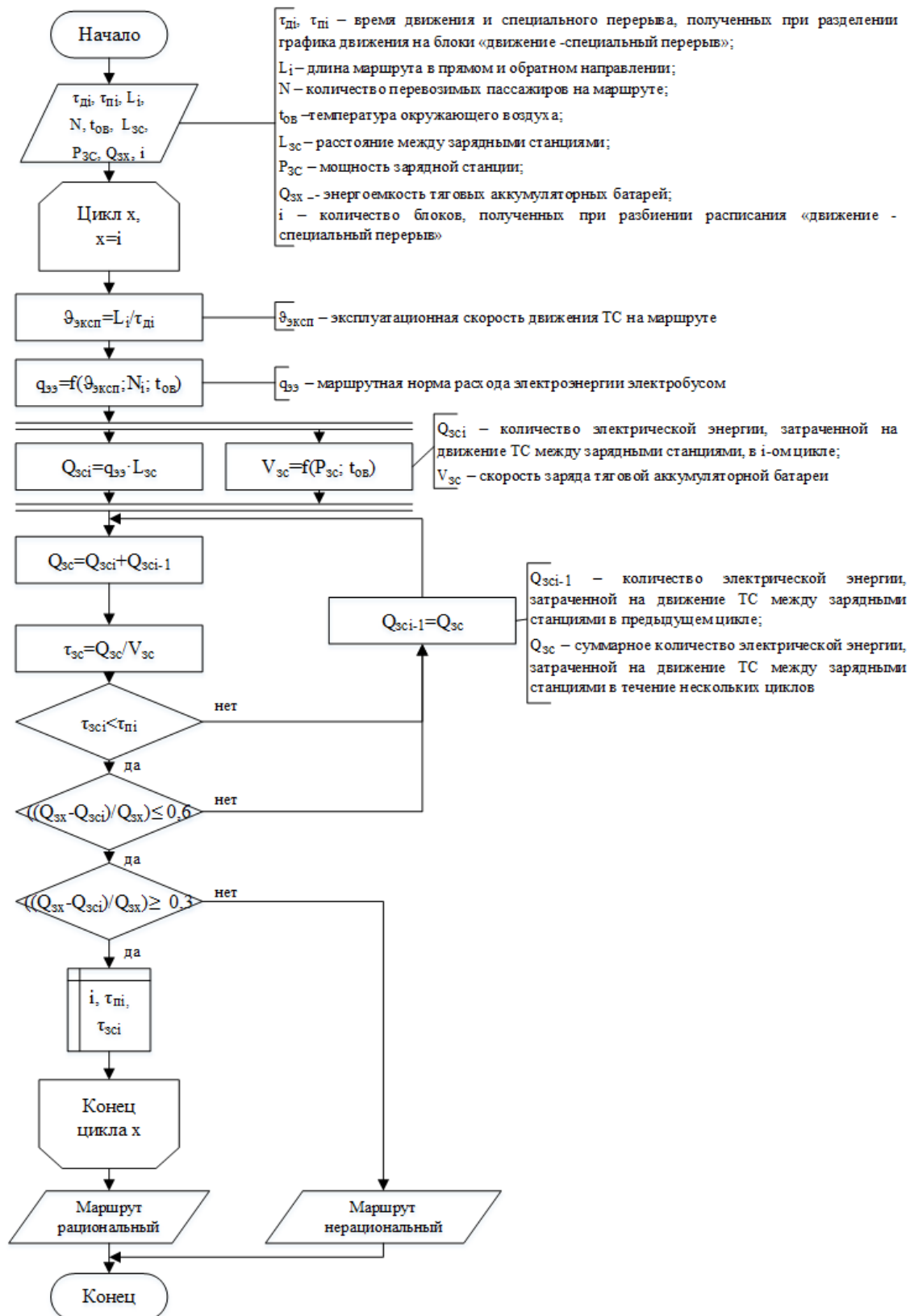


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса

Fig. 3 – The algorithm for selecting a rational urban regular route for an electric bus operation

Норма расхода электроэнергии на маршруте – это значение, которое будет получено в результате расчета разработанных закономерностей, учитывающих эксплуатационную скорость движения транспортных средств, количество перевезенных пассажиров и температуру окружающего воздуха, и функций распределения, описывающих вероятностный характер данного значения. Увеличение количества перевезенных пассажиров на маршруте и снижение температуры воздуха приводит к увеличению расхода электроэнергии электробусом из тяговой аккумуляторной батареи, и, следовательно, приводит к увеличению количества зарядных сессий и времени простоя для восстановления заряда тяговых аккумуляторных батарей. Данные факторы также будут увеличивать и время зарядной сессии, которое в алгоритме учитывается в результате расчета скорости заряда тяговых аккумуляторных батарей, дополнительно зависящей от мощности зарядных станций. Данная величина будет оказывать влияние на время зарядной сессии. В результате несоответствия продолжительности зарядной сессии и перерывов количество запасенной энергии сохраняется и в следующем цикле уменьшается на то количество энергии, которое затрачивается на преодоление расстояния до зарядной станции в следующем цикле.

Разработанный алгоритм (рисунок 3) является основой для имитационной модели выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробусов, разработанной в программе Microsoft Office Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки разработанного алгоритма были выбраны 5 маршрутов в г. Тюмени с различной длиной маршрута и возможностью организации зарядных станций. Схема данных маршрутов на карте г. Тюмени представлена на рисунке 4.

Три из представленных маршрутов являются маятниковыми, но имеют только одну стоянку для отстоя транспортных средств во время зарядной сессии. Они соединяют несколько административных округов и пролегают через центральную часть г. Тюмени. Остальные маршруты являются кольцевыми. При этом один из них связывает различные социальные учреждения и имеет участок маршрута, проходящий через центральную магистраль города. Другой маршрут пролегает через кольцевую дорогу и обслуживает население в труднодоступных транспортных районах города. Фрагмент исходных данных маршрутов и электробуса, осуществляющего транспортное обслуживание и результаты оценки, представлены в таблице 2.

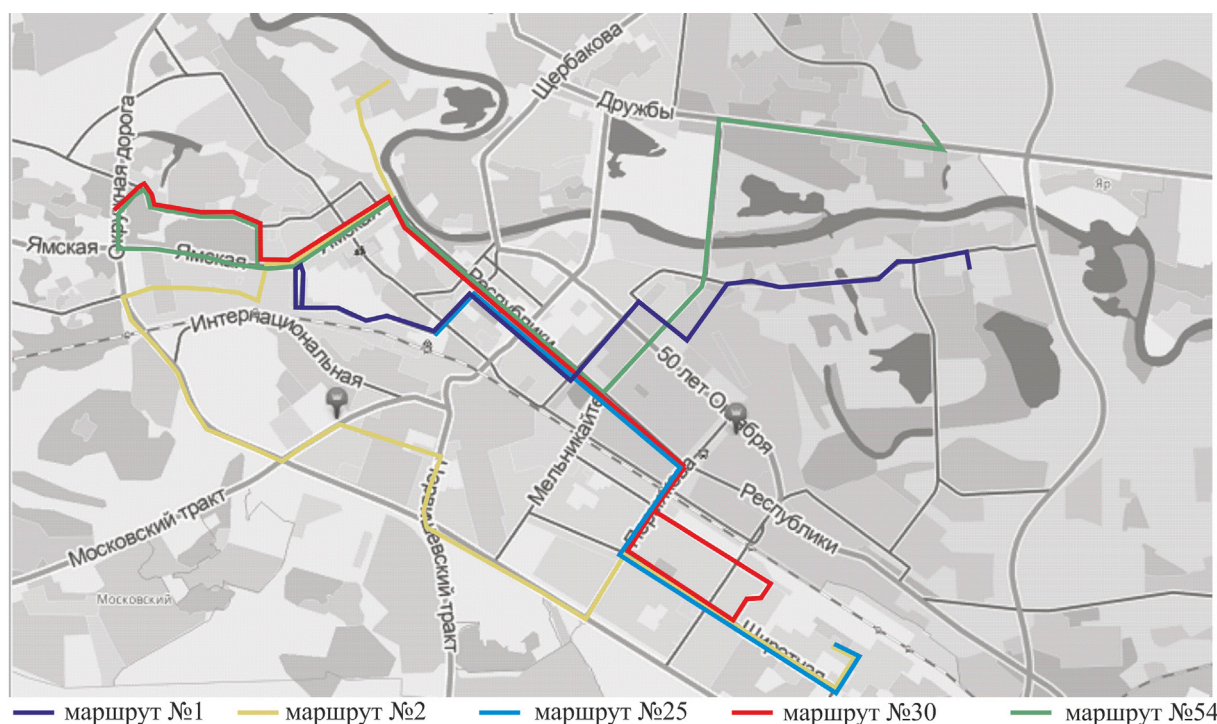


Рисунок 4 – Схема маршрутов, проанализированных с помощью алгоритма

Fig. 4 – Scheme of routes analyzed by the algorithm

Таблица 2
Характеристики маршрутов и результаты оценки для эксплуатации электробуса

Table 2
Route characteristics and assessment results for an electric bus operation

Характеристики	№ маршрута				
	1	2	25	30	54
Время движения, мин	121	181	57	130	149
Время перерыва, мин	18	39	14	10	47
Время движения, мин	123	208	56	129	150
Время перерыва, мин	65	64	39	39	25
Время движения, мин	121	176	105	125	145
Тип маршрута	маятниковый с одним парковочным местом для ЗС*	кольцевой с одним парковочным местом для ЗС*	маятниковый с одним парковочным местом для ЗС*	кольцевой с одним парковочным местом для ЗС*	маятниковый с одним парковочным местом для ЗС*
Расстояние между зарядными станциями, км	30	53	28	35	44
Мощность зарядной станции, кВт	50	50	50	50	50
Энергоемкость блока батарей, кВт*ч	127	127	127	127	127
Рассчитываемое количество циклов	3	3	3	3	3
Результат оценки маршрута для эксплуатации электробуса	рациональный	нерациональный	рациональный	рациональный	нерациональный

*- зарядная станция

В результате расчета с помощью имитационной модели данных маршрутов было выявлено, что три из представленных маршрутов являются рациональными и технически возможно ввести в эксплуатацию электробусы на маршрутах № 25, 30 и 1. А два из выбранных маршрутов не удовлетворяют ограничениям по соответствию продолжительности заряда тяговых аккумуляторных батарей и перерывов, а также по количеству энергии, сохраненной в тяговой аккумуляторной батарее в результате совершения автономного пробега. Разработанный алгоритм и на его основе имитационная модель могут быть применены для технической оценки рациональности маршрута для эксплуатации электробуса. В дальнейшем выбранные маршруты будут оцениваться по экономическим показателям, а именно доходности маршрута и эксплуатационным затратам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При активном внедрении электробусов возникает проблема выбора рационального маршрута. В ходе анализа ранее выполненных работ и опыта эксплуатации сформулирован исчерпывающий перечень факторов,

оказывающих влияние на выбор рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса. Используя экспертные мнения, выявлены наиболее существенные факторы, для которых составлена схема их взаимного влияния. С учетом анализа ранее проведенных исследований и требований нормативно-правовых актов сформулированы ограничения для разработки алгоритма: по площади парковочного места, отводимого для отстоя транспортных средств; по уровню заряда тяговой аккумуляторной батареи; по режиму труда и отдыха водителей и расписанию движения транспортных средств. Выполнены процедуры проверки разработанного алгоритма на маршрутной сети г. Тюмени.

Авторы предлагают поэтапно определить все маршруты в городе, которым можно присвоить метку «рациональные» для эксплуатации электробусов, а на последующих маршрутах в случае принятия решения по эксплуатации выявить потребность в изменении расписания движения транспортных средств или организации дополнительных парковочных мест для зарядки электробуса.

В ходе продолжения данных исследований будет разработан дополнительно алгоритм экономической оценки маршрутов для эксплуатации электробусов. Это будет способствовать постепенному вводу и распространению электробусов в регионах Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Conti V., Orchi S., Valentini M., Nigro M., Calo R. Design and evaluation of electric solutions for public transport // *Transportation Research Procedia*. 2017. 27: 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.033>
2. Fusco G., Alessandrini A., Colombaroni Ch., Pia Valentini M. A model for transit design with choice of electric charging system // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2013. 8: 234-249. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.10.607>
3. Pternea M., Kepaptsoglou K., Karlaftis M. Sustainable urban transit network design // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2015. 7: 276-291. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.024>
4. Kunith A., Mendelevitch R., Goehlich D. Electrification of a city bus network – An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems // *International Journal of Sustainable Transportation*. 2017. 10 (11): 707-720. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1310962>
5. De Filippo G., Marano V., Sioshansi R. Simulation of an electric transportation system at The Ohio State University // *Applied Energy*. 2014. 11: 1686-1691. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.011>
6. Vepsäläinen J., Kivekäs K., Otto K., Lajunen A., Tammi K. Development and validation of energy demand uncertainty model for electric city buses // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018. 63: 347-361. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.06.004>
7. Basma H., Mansour Ch., Haddad M., Nemer M., Stabat P. Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses // *Energy*. 2020. Vol. 207. Article No. 118241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118241>
8. Gallet M., Massier T., Hamacher T. Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks // *Applied Energy*. 2020. 230: 344-356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.086>
9. Gallet M., Massier T., Zehe D. Developing a Large-Scale Microscopic Model of Electric Public Bus Operation and Charging. // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. January 2020. 10: 1-5. 10.1109/VPPC46532.2019.8952361
10. Gabsalikhova L., Sadygova G., Almetova Z. Activities to convert the public transport fleet to electric buses // *Transportation Research Procedia*. 2018. 36: 669-675. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.127>
11. Bezruchonak A. Geographic features of zero-emissions urban mobility: the case of electric buses in Europe and Belarus // *European spatial research and policy*. 2019. 26(1): 81-99. 10.18778/1231-1952.26.1.05
12. Deliali A., Chhan D., Oliver J., Sayess R., Godri Politt K.J., Chritofa E. Transitioning to zeroemission

bus fleets: state of practice of implementations in the United States // *Transport Reviews*. 2021. 41(2): 164-191. <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1800132>

13. Pelletier S., Jabali O., Mendoza J.E., Laporte G. The electric bus fleet transition problem // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. 109: 174-193. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.10.012>

14. Wei R., Liu X., Ou Y., Kiavash Fayyaz S. Optimizing the spatio-temporal deployment of battery electric bus system // *Journal of Transport Geography*. 2018. 68: 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013>

15. Tesar M., Berthold K., Gruhler J-P., Gratzfeld P. Design Methodology for the Electrification of Urban Bus Lines with Battery Electric Buses // *Transportation Research Procedia*. 2020. 48: 2038-2055. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.264>

16. Hamurcu M., Eren T. Electric Bus Selection with Multicriteria Decision Analysis for Green Transportation // *Sustainability*. 2020. 12(7). Article No.2777. <https://doi.org/10.3390/su12072777>

17. Krawiec K. Vehicle cycle hierarchization model to determine the order of battery electric bus deployment in public transport // *Transport Problems*. 2021. 16(1): 99-112. 10.21307/tp-2021-009

18. Topić J., Soldo J., Maletić F., Škugor B., Deur J. Virtual Simulation of Electric Bus Fleets for City Bus Transport Electrification Planning // *Energies*. 2020. 13(13). Article No. 3410. <https://doi.org/10.3390/en13133410>

19. Lin K.C., Lin C.N., Ying J.C. Construction of analytical models for driving energy consumption of electric buses through machine learning // *Applied Sciences*. 2020. 10(17). Article No. 6088. <https://doi.org/10.3390/app10176088>

20. Косицын Б.Б. Экспериментальное исследование энергоэффективного закона управления движением электробуса на городском маршруте // *Журнал автомобильных инженеров*. 2017. №5 (106). С. 15–23.

21. Фролов Д.С. Электробус... Опыт эксплуатации в России. – М.: ГУП «Мосгортранс», 2017. URL: http://www.mueta-ufa.ru/files/Razvitiye_tramvaynoy_seti+.pdf

REFERENCES

1. Conti V., Orchi S., Valentini M., Nigro M., Calo R. Design and evaluation of electric solutions for public transport // *Transportation Research Procedia*. 2017. 27: 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.033>
2. Fusco G., Alessandrini A., Colombaroni Ch., Pia Valentini M. A model for transit design with choice of electric charging system // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2013. 8: 234-249. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.10.607>
3. Pternea M., Kepaptsoglou K., Karlaftis M. Sustainable urban transit network design // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2015. 7: 276-291. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.024>
4. Kunith A., Mendelevitch R., Goehlich D. Electrification of a city bus network – An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems //

International Journal of Sustainable Transportation. 2017. 10 (11): 707-720. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1310962>

5. De Filippo G., Marano V., Sioshansi R. Simulation of an electric transportation system at The Ohio State University // *Applied Energy*. 2014. 11: 1686-1691. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.011>

6. Vepsäläinen J., Kivekäs K., Otto K., Lajunen A., Tammi K. Development and validation of energy demand uncertainty model for electric city buses // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018. 63: 347-361. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.06.004>

7. Basma H., Mansour Ch., Haddad M., Nemer M., Stabat P. Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses // *Energy*. 2020. Vol. 207. Article No. 118241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118241>

8. Gallet M., Massier T., Hamacher T. Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks // *Applied Energy*. 2020. 230: 344-356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.086>

9. Gallet M., Massier T., Zehe D. Developing a Large-Scale Microscopic Model of Electric Public Bus Operation and Charging. // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. January 2020. 10: 1-5. 10.1109/VPPC46532.2019.8952361

10. Gabsalikhova L., Sadygova G., Almetova Z. Activities to convert the public transport fleet to electric buses // *Transportation Research Procedia*. 2018. 36: 669-675. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.127>

11. Bezruchonak A. Geographic features of zero-emissions urban mobility: the case of electric buses in Europe and Belarus // *European spatial research and policy*. 2019. 26(1): 81-99. 10.18778/1231-1952.26.1.05

12. Deliali A., Chhan D., Oliver J., Sayess R., Godri Politt K.J., Chritofa E. Transitioning to zeroemission bus fleets: state of practice of implementations in the United States // *Transport Reviews*. 2021. 41(2): 164-191. <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1800132>

13. Pelletier S., Jabali O., Mendoza J.E., Laporte G. The electric bus fleet transition problem // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. 109: 174-193. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.10.012>

14. Wei R., Liu X., Ou Y., Kiavash Fayyaz S. Optimizing the spatio-temporal deployment of battery electric bus system // *Journal of Transport Geography*. 2018. 68: 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013>

15. Tesar M., Berthold K., Gruhler J-P., Gratzfeld P. Design Methodology for the Electrification of Urban Bus Lines with Battery Electric Buses // *Transportation Research Procedia*. 2020. 48: 2038-2055. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.264>

16. Hamurcu M., Eren T. Electric Bus Selection with Multicriteria Decision Analysis for Green Transportation // *Sustainability*. 2020. 12(7). Article No.2777. <https://doi.org/10.3390/su12072777>

17. Krawiec K. Vehicle cycle hierarchization model to determine the order of battery electric bus deployment in public transport // *Transport Problems*. 2021. 16(1): 99-112. 10.21307/tp-2021-009

18. Topić J., Soldo J., Maletić F., Škugor B., Deur J. Virtual Simulation of Electric Bus Fleets for City Bus Transport Electrification Planning // *Energies*. 2020. 13(13). Article No. 3410. <https://doi.org/10.3390/en13133410>

19. Lin K.C., Lin C.N., Ying J.C. Construction of analytical models for driving energy consumption of electric buses through machine learning // *Applied Sciences*. 2020. 10(17). Article No. 6088. <https://doi.org/10.3390/app10176088>

20. Kosicyn B.B. Jeksperimental'noe issledovanie jenergoeffektivnogo zakona upravlenija dvizheniem jelektrobuses na gorodskom marshrute. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*, 2017, 5 (106): 15-23. (In Russian)

21. Frolov D. S. Jelektrobus... Opyt jekspluatatsii v Rossii. – M.: GUP «Mosgortrans», 2017. URL: http://www.mueta-ufa.ru/files/Razvitiye_tramvaynoy_seti+.pdf (In Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Горбунова А. Д. Анализ ранее выполненных работ, разработка алгоритма и его верификация.

Смирнова О. Ю. Корректировка схемы взаимного влияния факторов при выборе маршрута, проверка алгоритма на наличие причинно-следственных связей.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Anastasia D. Gorbunova – analysis of previous researches, development of an algorithm and its verification

Olga Yu. Smirnova – correction of the mutual relation scheme of factors for selecting a route, checking the algorithm for the presence of causal relationships.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горбунова Анастасия Дмитриевна – аспирант кафедры эксплуатации автомобильного транспорта Тюменского государственного университета, ORCID: 0000-0002-5083-2601 (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, e-mail: gorbunovaad94@gmail.com).

Смирнова Ольга Юрьевна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автомобильного транспорта строительных и дорожных машин, ORCID: 0000-0001-8951-6449 (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, e-mail: smirnovaaj@tyuiu.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasia D. Gorbunova – Postgraduate student of the Motor Transport Operation Department, Industrial University of Tyumen, ORCID: 0000-0002-5083-2601 (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38, e-mail: gorbunovaad94@gmail.com)

Olga Yu. Smirnova – Cand. of Sci., Associate Professor of the Automobile Transport, Construction and Road Machine Department, ORCID: 0000-0001-8951-6449 (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38, e-mail: smirnovaaj@tyuiu.ru)