

ТРАНСПОРТ

УДК 656.131

DOI: 10.25198/2077-7175-2020-4-113

ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКА ТРЕБОВАНИЙ НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЗАРЯДА ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГОРОДСКОЙ ЗАРЯДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

А. Д. Горбунова¹, И. А. Анисимов²

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

¹e-mail: burakova.1992@mail.ru

²e-mail: tkcc@list.ru

Аннотация. В настоящее время одним из мировых трендов, который согласно стратегии развития автомобильной промышленности, на период до 2025 г. должен наблюдаться в Российской Федерации, является переход к эксплуатации электрических транспортных средств. При этом в качестве обязательного условия реализации данного направления эксперты рассматривают создание развитой зарядной инфраструктуры, что отражено в качестве одного из пунктов плана мероприятий по реализации стратегии развития автомобильной промышленности на период до 2025 г.

Это обуславливает необходимость разработки методики обоснования параметров городской зарядной инфраструктуры для электромобилей. В мире уже разработаны научные подходы к проектированию автообслуживающих предприятий, и в частности, зарядной инфраструктуры. Они основаны на теории систем массового обслуживания и в качестве исходных данных рассматривают количество электромобилей, запас хода, среднесуточный пробег. Однако они не учитывают особенностей эксплуатации электрических транспортных средств в Российской Федерации, к которым можно отнести высокую долю использования личных точек подключения к электросети, а также технические параметры электромобилей. Поэтому цель данной статьи заключается в изучении особенностей формирования потока заявок на заряд тяговой батареи электромобилей на территории городов Российской Федерации.

Для достижения поставленной цели были проведены теоретические исследования, которые включали разработку системы формирования необходимого числа зарядных станций для электромобилей на территории города на основе системного подхода; выявление факторов, оказывающих наибольшее влияние на количество рассматриваемых объектов, с помощью априорного ранжирования; и разработку математических моделей на основе математического моделирования.

Гипотезы, выдвинутые в ходе теоретического исследования, были подтверждены в ходе обработки экспериментальных данных методами математической статистики. В результате входной поток требований на восстановление заряда тяговой аккумуляторной батареи электромобилей при использовании городской зарядной инфраструктуры был описан с помощью функции распределения количества зарядных сессий, выполняемых в течение суток, регрессионных и гармонической модели.

Научная новизна исследования заключается в разработке математических моделей, описывающих поступление заявок на заряд тяговой аккумуляторной батареи электромобилей с учетом особенностей их эксплуатации в Российской Федерации.

Полученные результаты будут в дальнейшем использованы для построения имитационной модели определения оптимального количества зарядных станций на территории города с учетом минимизации эксплуатационных затрат владельцев электромобилей и зарядной инфраструктуры.

Ключевые слова: зарядная станция, электромобиль, тяговая аккумуляторная батарея, теория систем массового обслуживания, поток требований на восстановление заряда.

Для цитирования: Горбунова А. Д., Анисимов И. А. Формирование потока требований на восстановление заряда тяговой аккумуляторной батареи электромобилей при использовании городской зарядной инфраструктуры // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 3. – С. 113–124. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-4-113.

FORMATION OF THE REQUIREMENT FLOW FOR RESTORING THE CHARGE OF THE ELECTRIC CAR POWER BATTERY WHEN USING THE CITY CHARGING INFRASTRUCTURE

A. D. Gorbunova¹, I. A. Anisimov²

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

¹e-mail: burakova.1992@mail.ru

²e-mail: tkcc@list.ru

Abstract. Currently, one of the global trends, which according to the development strategy of the automotive industry for the period until 2025 should be observed in the Russian Federation, is the transition to the operation of electric vehicles. At the same time, experts consider the creation of a developed charging infrastructure as a prerequisite for the implementation of this direction, which is reflected as one of the points in the action plan for implementing the development strategy of the automotive industry for the period up to 2025. Its decision necessitates the development of a methodology for substantiating the parameters of the urban charging infrastructure for electric vehicles. The world has already developed scientific approaches to the design of auto-service enterprises, and in particular charging infrastructure. They are based on the theory of queuing systems and consider the number of electric vehicles, range, average daily mileage as initial data. However, they do not take into account the peculiarities of the electric vehicle operation in the Russian Federation, which include a high share of the use of personal points of connection to the electric grid, as well as the technical parameters of electric vehicles. Therefore, the purpose of this article is to study the features of the formation of the application flow for the charge of the traction battery of electric vehicles in the cities of the Russian Federation. To achieve this goal, theoretical studies were carried out, they included the development of a system for the formation of the required number of charging stations for electric vehicles in the city based on a systematic approach; identification of factors that have the greatest impact on the number of considered objects using a priori ranking; and the development of mathematical models based on mathematical modeling. The hypotheses put forward in the course of a theoretical study were confirmed during the processing of experimental data by methods of mathematical statistics. As a result, the input flow of requirements for restoring the charge of the traction battery of electric vehicles when using the urban charging infrastructure was described using the distribution function of the number of charging sessions performed during the day, regression and harmonic models. The scientific novelty of the study lies in the development of mathematical models that describe the receipt of applications for the charge of the traction battery of electric vehicles, taking into account the features of their operation in the Russian Federation. The results will be further used to build a simulation model for determining the optimal number of charging stations in the city, taking into account the minimization of operating costs for owners of electric vehicles and charging infrastructure.

Key words: charging station, electric vehicle, traction battery, queuing system theory, charge recovery requirement flow

Cite as: Gorbunova, A. D., Anisimov, I. A. (2020) [Formation of the requirement flow for restoring the charge of the electric car power battery when using the city charging infrastructure]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 4. 113–124. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-4-113.

Введение

Эксплуатация транспортных средств, использующих новые виды топлива и энергии, обуславливает создание инфраструктуры соответствующих автообслуживающих предприятий. Наблюдаемое в настоящее время увеличение численности электрических транспортных средств вызывает необходимость создания сетей зарядных станций. При этом развитие данной инфраструктуры одновременно является важным фактором, оказывающим влияние на вероятность приобретения электромо-

биля потенциальным владельцем. Согласно данным агентства Deloitte введение в эксплуатацию 2500 зарядных станций в Нидерландах в 2011–2012 гг. привели к увеличению численности парка электрических транспортных средств на 15 833 ед. Внедрение программы развития зарядной инфраструктуры в Норвегии в 2010 году вызвало рост продаж электромобилей более чем на 10 000 ед¹.

В современном мире лидером по развитию электрических транспортных средств является Китай. В данной стране зарегистрировано более 3,5 млн

¹ Deloitte. Мировой опыт стимулирования рынка экологических видов транспорта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ru/Documents/Corporate_responsibility/russian/ru_international_experience_rus.pdf (дата обращения: 03.04.2020).

электромобилей и введено в эксплуатацию около 460 000 зарядных станций. Данные значения превышают показатели США, Европейского союза и Японии. Однако в соответствии с данными доклада, выполненного Center of Automotive Management, в 2020 году активный рост парка электромобилей должен наблюдаться и в Европейских странах, которые имеют достаточно развитую зарядную инфраструктуру после Китая и США².

В Российской Федерации согласно стратегии развития автомобильной промышленности на период до 2025 г. формирование парка электрических транспортных средств рассматривается в качестве мирового тренда, который должен обязательно поддерживаться созданием развитой зарядной инфраструктуры³. В настоящее время на территории страны расположены 161 зарядная станция. При этом наибольшее их число сосредоточено в г. Москве, Московской области и в г. Санкт-Петербурге. Региональная зарядная инфраструктура отстает в развитии. Однако в соответствии с планом мероприятий по реализации стратегии развития автомобильной промышленности до 2025 г.⁴ для создания инфраструктуры, необходимой для зарядки электромобилей, предусмотрена разработка предложений по формированию программы оснащения дорожных и городских объектов комплексами зарядных станций для транспортных средств с электродвигателями. При этом в ходе анализа мирового опыта было выявлено, что при организации сетей зарядных станций изучаются и применяются разработанные научно-обоснованные подходы, которые направлены на минимизацию затрат владельцев электромобилей при зарядке тяговой аккумуляторной батареи и на снижение капитальных и эксплуатационных затрат организаций, создающих инфраструктуру. Данные тенденции обуславливают необходимость изучения особенностей использования существующей зарядной инфраструктуры для электромобилей в Российской Федерации и разработки научных подходов к обоснованию параметров проектируемых сетей зарядных станций на территории городов.

Обзор литературы

Разработка научных подходов к расчету параметров автообслуживающих предприятий, к которым

согласно классификации автомобильных предприятий Напольского Г. М. относятся зарядные станции для электромобилей, рассматривается в работах Плитмана И. Б., Коваленко, В. Г., Кантора Ф. М., Хабарова С. Р., Юсупова И. Ю., Буткова П. П., Халушакова З. Б. и др. [5, 6, 9]. В данных исследованиях расчет параметров автозаправочных станций основан на теории систем массового обслуживания, которая предполагает выявление интенсивности поступления заявок в систему и времени их обслуживания. Так в работе Коваленко В. Г., Кантора Ф. М., Хабарова С. Р. интенсивность поступления заявок в систему рассматривалась как простейший поток, а время обслуживания транспортных средств описывалось с помощью показательного закона. Количество топливораздаточных комплексов в системе рассчитывалось с учетом соответствия приведенной плотности потока заявок [6]. В ходе дальнейшего изучения особенностей функционирования автообслуживающих предприятий данный подход был дополнен Юсуповым И. Ю., который предложил оценивать функционирование автозаправочных станций с помощью трех групп параметров: входных, внутренних и выходных [5]. В результате количество топливораздаточных комплексов подбиралось на основе анализа коэффициентов использования, занятости и потерь от простоев рассматриваемых объектов, а также автотранспортных средств. При этом интенсивность входного потока заявок определялась на основе эмпирических данных и разработанной математической модели, описывающей изменение количества автотранспортных средств от времени суток. Влияние статистических данных о парке на интенсивность поступления заявок на обслуживание заправочными станциями рассматривалось в работах Халушакова З. Б., Вельниковского А. А. и др. [3, 9]. Параметры автозаправочных станций были определены на основе анализа данных о существующем и прогнозируемом парке автотранспортных средств, их средних пробегах и существующих нормах законодательства. Показателями эффективности работы рассматриваемого объекта были выбраны убытки от простоев транспортных средств или дополнительные пробеги, и также затраты от недоиспользования мощности автозаправочной станции.

Затраты на простои и время ожидания в очереди на автозаправочной станции также были выбраны

² European Automobile Manufacturers Association. Making the transition to zero-emission mobility [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.acea.be/uploads/publications/Study_ECV_barriers.pdf (дата обращения: 03.04.2020).

³ Об утверждении Стратегии развития автомобильной промышленности до 2025 года [Электронный ресурс] : распоряжение правительства РФ от 28 апреля 2018 г. №831-п // Правительство России. Документы. – Режим доступа: <http://government.ru/docs/32547/> (дата обращения: 10.03.2020).

⁴ Об утверждении плана мероприятий по реализации Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2025 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_340442/ (дата обращения: 10.03.2020).

в качестве некоторых показателей эффективности исследуемого автообслуживающего предприятия в работе Безродного А. А. [2]. Поток заявок на обслуживание в данной модели был описан с помощью потоков Эрланга, где в качестве параметра, определяющего возникновение события, был выбран интервал времени между ними.

Теория систем массового обслуживания также была применена в работах Асадова Д. Г., Легезова Г. В., Farkas C., Li R., Mehjerdi H. и др. при описании модели функционирования зарядных станций для мобильных электроагрегатов [1, 7, 10, 14, 15]. Характер входного потока в данном исследовании определялся на основе среднего расстояния между ближайшими станциями, соотношения между скоростями движения с грузом и без груза и времени остановок. В результате необходимое количество зарядных станций для мобильных электроагрегатов зависело от их общего количества; их доли, заряжаемой обычным способом; коэффициента использования, изменяющегося во времени; производительности зарядной станции и коэффициента сменности.

Расчет количества зарядных станций, необходимых для обслуживания электромобилей, был выполнен в работах Frade I., Gimenez-Gaydou D. и др. [11–13, 16, 17]. Исходными данными для расчета потребного количества изучаемых объектов были выбраны количество эксплуатируемых и прогнозируемых электромобилей, их запас хода, среднесуточный пробег. Однако в данных работах не учитывалась доля электромобилей, которая может быть заряжена в частных домовладениях без использования общественных зарядных станций, что характерно при использовании транспортных средств с электрическим двигателем на территории Российской Федерации. Также на формирование потока заявок, обслуживаемых зарядными станциями, могут оказывать природно-климатические особенности эксплуатации транспортных средств и технические параметры используемых электромобилей. Это обуславливает необходимость разработки методики обоснования параметров городской зарядной инфраструктуры для электромобилей на территории Российской Федерации, которая позволит рассчитать потребное количество зарядных станций и рационально расположить их в пределах города. В ходе анализа ранее выполненных работ выявлено, что расчет необходимого количества зарядных станций выполняется на основании теории систем массового обслуживания, которая предполагает изучение особенностей формирования входного потока заявок и времени их обслуживания. Таким образом, целью данной работы является изучение особенностей формирования потока заявок на заряд тяговой батареи электромобилей на территории городов Российской Федерации.

Теоретические исследования

В ходе анализа ранее выполненных работ было выявлено, что в качестве факторов, оказывающих влияние на расчет необходимого количества зарядных станций на территории городов, рассматривают: общее количество электромобилей (ЭМ); их долю, заряжаемую от общественных зарядных станций; коэффициент использования зарядных станций в течение суток; производительность зарядной станции; запас хода электромобилей; среднесуточный пробег транспортных средств. При этом учитывая особенности расположения городов Российской Федерации, для которых характерны переменные природно-климатические условия эксплуатации, необходимо учитывать температуру окружающего воздуха. Таким образом, факторы, оказывающие влияние на расчет необходимого количества зарядных станций на территории городов Российской Федерации, были систематизированы с помощью схемы формирования необходимого числа зарядных станций для электромобилей, которая представлена на рисунке 1.

Факторы, влияющие на характеристики входного потока и процесса обслуживания, были оценены экспертами, что позволило выявить наиболее весомые из них [8]. Результаты априорного ранжирования факторов представлены на рисунке 2.

Согласно результатам априорного ранжирования факторами, которые оказывают существенное влияние на количество зарядных станций на территории города, приняты те, сумма рангов которых меньше среднего значения – 52. Это количество зарегистрированных электромобилей (ЭМ); ёмкость тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ); параметры, местоположение и стоимость зарядных станций; цена зарядной сессии. В опросе принимало участие 8 экспертов, компетентность которых была предварительно оценена с помощью тестирования. Степень согласованности экспертов, определенная с помощью коэффициента конкордации Кэнделла, составила 0,55, что существенно отличается от нуля и свидетельствует о согласии мнений опрошенных. Также с помощью критерия Пирсона, расчетное значение которого было больше табличного, была проверена гипотеза о неслучайности согласия экспертов. Полученные результаты данного этапа исследования будут использованы для изучения закономерностей изменения интенсивности потока электромобилей на восстановление заряда тяговой аккумуляторной батареи и длительности обслуживания их, что позволит выявить оптимальное количество зарядных станций.

Интенсивность потока электромобилей на восстановление заряда тяговой аккумуляторной батареи принята как их количество, поступающее в течение часа. Однако низкое значение требований на обслуживание в течение суток обуславливает зна-

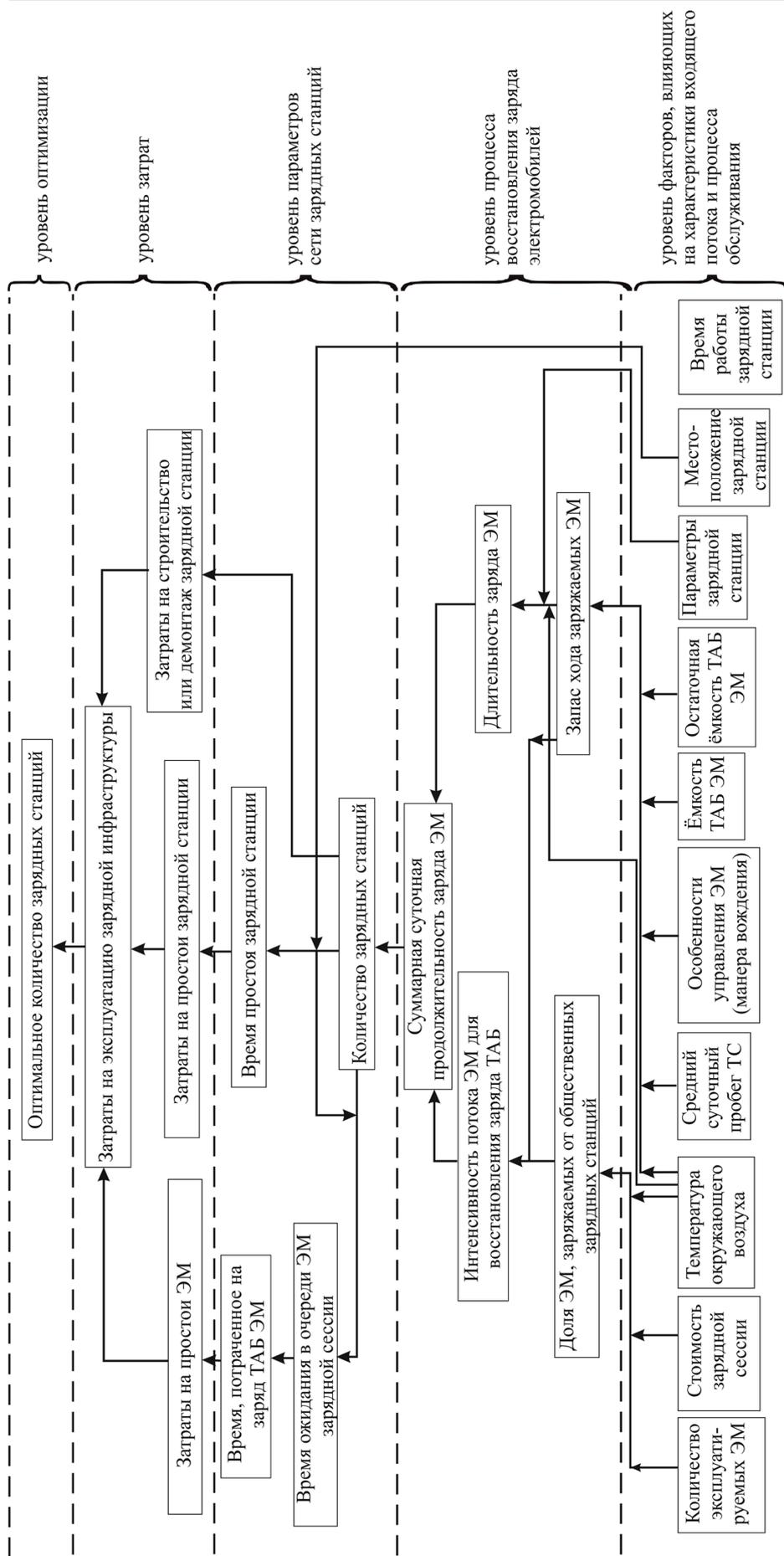


Рисунок 1. Предварительная схема системы формирования необходимого числа зарядных станций для электромобилей на территории города

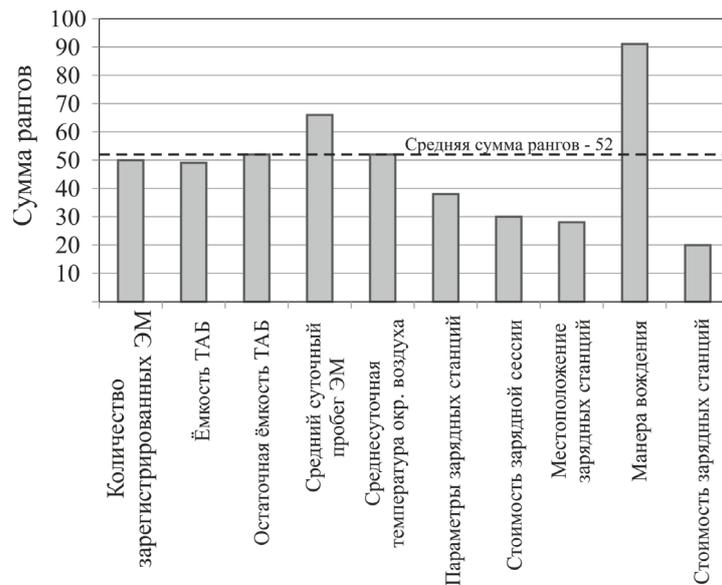


Рисунок 2. Результаты априорного ранжирования факторов, оказывающих влияние на характеристики входного потока и процесса обслуживания

чительную продолжительность времени простоя зарядных станций и нулевые значения, что приводит к необходимости предварительного изучения количества зарядных сессий, выполняемых в течение суток, а затем их распределение по времени. В данном исследовании количество зарядных сессий ($N_{ЗС}$) определено суммарно для всех зарядных станций, расположенных на территории города.

Процесс формирования потока заявок имеет вероятностный характер и может быть описан с помощью функции распределения, которая позволяет выявить наиболее вероятное количество зарядных сессий, выполняемых в течение суток. При этом, как ранее было выявлено, данное значение имеет зависимость от запаса хода электромобилей и доли парка рассматриваемых транспортных средств, использующих общественную зарядную инфраструктуру, которые формируются на основании факторов, указанных на рисунке 1. Интенсивность поступления заявок на обслуживание в течение часа будет рассчитана с помощью коэффициента использования зарядной станции, который описывается с помощью гармонической модели.

При разработке регрессионной модели, описывающей изменение количества зарядных сессий в течение суток от среднего запаса хода электромобилей в парке, были приняты ограничения, что количество зарядных сессий должно быть больше нуля. В результате данная однофакторная математическая модель будет иметь вид:

$$N_{ЗС} = \frac{1}{a + b \cdot L}, \quad (1)$$

где

$N_{ЗС}$ – количество зарядных сессий, выполняемых

совокупностью зарядных станций, расположенных на территории города, зар. сесс./сутки;

L – средний запас хода электромобилей в парке, км.;

a, b – параметры модели, 1/зар. сесс., 1/(км×зар. сесс.).

В настоящее время авторами разработана только регрессионная модель, необходимая для предварительного выявления связей между количеством зарядных сессий, выполняемых в течение суток, и численностью электромобилей, заряжаемых от общественных зарядных станций. Доля электромобилей, использующих общественную инфраструктуру, будет рассчитана на основе полученных данных в ходе следующего этапа исследования. Математическая модель расчета количества зарядных сессий, выполняемых в течение суток от количества электромобилей, заряжаемых от общественных зарядных станций, имеет вид (2):

$$N_{ЗС} = c \cdot N_{ЭМ}, \quad (2)$$

где

$N_{ЗС}$ – количество зарядных сессий, выполняемых совокупностью зарядных станций, расположенных на территории города, зар. сесс./сутки;

$N_{ЭМ}$ – количество электромобилей, заряжаемых от общественной зарядной инфраструктуры, авто.;

c – параметр модели, зар. сесс./авто.

Для подтверждения полученных регрессионных моделей, а также для выявления функции распределения и гармонической модели изменения коэффициента использования зарядной станции были проведены экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования

В ходе экспериментальных исследований были обработаны и проанализированы данные о выполняемых зарядных сессиях в городах Российской Федерации, имеющих наиболее развитую зарядную инфраструктуру на первое октября 2019 г. Это г. Москва, г. Санкт-Петербург и г. Тюмень. Измерения количества зарядных сессий, выполняемых в течение суток, и их распределение по времени выполнялось в течение года в период с 1 октября 2018 по 1 октября 2019гг. с помощью сервиса, ре-

гистрирующего подключение к зарядной станции. Результаты измерений обрабатывались с помощью Microsoft Office Excel.

На первом этапе исследования была построена функция распределения количества зарядных сессий в течение суток, которая представлена на рисунке 3. Первоначально выборка была проверена на наличие грубых ошибок с помощью правила Томсона (по критерию Рошера), после чего проведена группировка данных по интервалам.

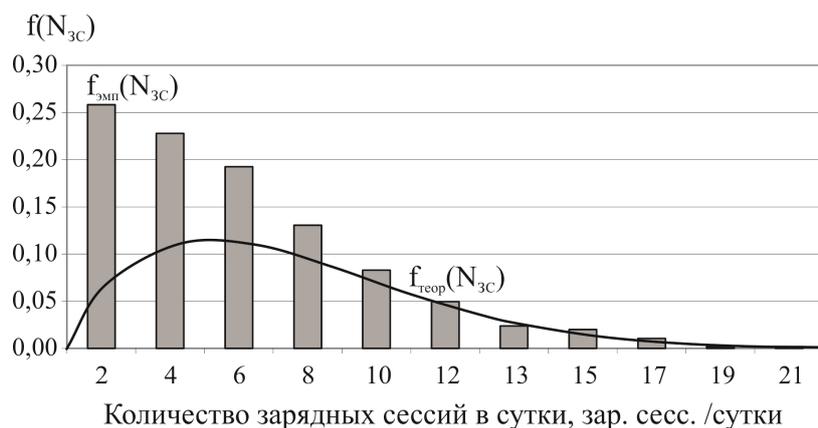


Рисунок 3. Функция распределения количества зарядных сессий, выполняемых в течение суток городской зарядной инфраструктурой

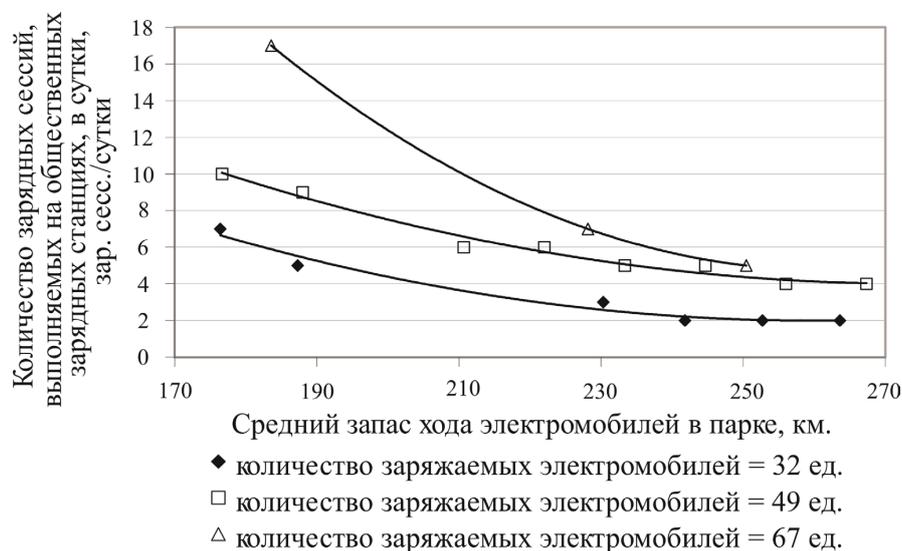


Рисунок 4. Закономерность изменения количества зарядных сессий, выполняемых в течение суток, от среднего запаса хода электромобилей в парке

Объем выборки составил 1049 значений, которые были сгруппированы в 11 интервалов. Математическое ожидание составило 5 зарядных сессий в сутки, коэффициент вариации 0,61, коэффи-

циент асимметрии 0,98, эксцесс – 3,36. В соответствии с полученными значениями характеристик распределения был сделан вывод о теоретической функции распределения, которая подчиняется зако-

ну Вейбулла. Это было подтверждено с помощью критерия Пирсона, расчетное значение которого составило 139,71 (что больше табличного значения – 2,92 и свидетельствует о согласии частот).

В результате обработки экспериментальных данных было установлено, что полученное математическое ожидание равно 5 может изменяться от 4 до 9 зарядных сессий в сутки в зависимости от средней ёмкости тяговых аккумуляторных батарей, которые определяют средний запас хода, а также численности электромобилей, использующих общественную зарядную инфраструктуру. Поэтому изменение математического ожидания будет описываться с помощью регрессионных моделей.

Запас хода для электромобилей был определен по утвержденному мировому ездовому циклу, который используется в частности для его оценки (WLTP). По полученным данным была построена закономерность изменения количества зарядных сессий, выполняемых в течение суток, от среднего запаса хода электромобилей по парку (рисунок 4).

При изучении закономерности данные были сгруппированы по интервалам среднего запаса хода электромобилей в парке, затем в каждом интервале была построена функция распределения. С помо-

щью критерия Пирсона подтверждено, что она подчиняется нормальному закону распределения. Это позволило рассчитать необходимое количество данных при заданном уровне погрешности в 10%. По средним значениям количества зарядных сессий, выполняемых в течение суток и соответствующим каждому интервалу среднего запаса хода, была построена закономерность (рисунок 4).

С увеличением среднего запаса хода электромобилей в парке наблюдается снижение количества зарядных сессий, выполняемых зарядными станциями в течение суток. По полученным данным также был проведен корреляционно-регрессионный анализ, который позволил выявить статистические характеристики и параметры модели (1). Результаты анализа представлены в таблице 1. Значения коэффициента корреляции более 0,95 свидетельствуют о высокой тесноте связей, что также подтверждает соблюдение условия, при котором расчетное значение критерия Стьюдента больше табличного. Высокое значение дисперсионного отношения Фишера, которое превышает табличное, позволяет сделать вывод об адекватности модели. Это также подтверждает значение средней ошибки аппроксимации, которое менее 10...15%.

Таблица 1. Статистические характеристики и параметры модели (1).

Количество заряжаемых электромобилей, авто.	Параметры модели		Коэффициент корреляции r	Коэффициент детерминации R^2	Табличное значение критерия Стьюдента t_p	Расчетное значение критерия Стьюдента t	Критерий Фишера F_p	Дисперсионное отношение Фишера F	Средняя ошибка аппроксимации \square , %
	a , 1/зар. сесс.	b , 1 / (км×зар. сесс.)							
32	-0,564	0,004	0,96	0,92	2,78	6,87	4,54	10,67	8,49
49	-0,227	0,002	0,95	0,91	2,44	7,64	3,78	9,38	7,12
67	-0,300	0,002	0,99	0,97	4,30	5,98	18,51	24,5	6,71

Таблица 2. Статистические характеристики и параметры модели (2).

Средний запас хода электромобилей в парке, км.	Параметр модели c , зар. сесс./ авто.	Коэффициент корреляции r	Коэффициент детерминации R^2	Табличное значение критерия Стьюдента t_p	Расчетное значение критерия Стьюдента t	Критерий Фишера F_p	Дисперсионное отношение Фишера F	Средняя ошибка аппроксимации \square , %
181,2	0,23	0,95	0,90	2,78	6,72	6,61	8,59	9,3
222,0	0,11	0,97	0,95	2,78	8,80	6,61	17,6	7,0
242,4	0,08	0,94	0,89	3,18	4,81	5,54	6,12	7,8

Изменение количества зарядных сессий, выполняемых в течение суток общественными зарядными станциями, также зависит и от количества

пользователей. Увеличение количества заряжаемых электромобилей приводит к росту количества выполняемых зарядными станциями зарядных сес-

сий в течение суток, что представлено на рисунке 5. Алгоритм расчета средних значений количества зарядных сессий при различной численности заря-

жаемых от общественной инфраструктуры электромобилей подобен представленному выше для закономерностей, отраженных на рисунке 4.

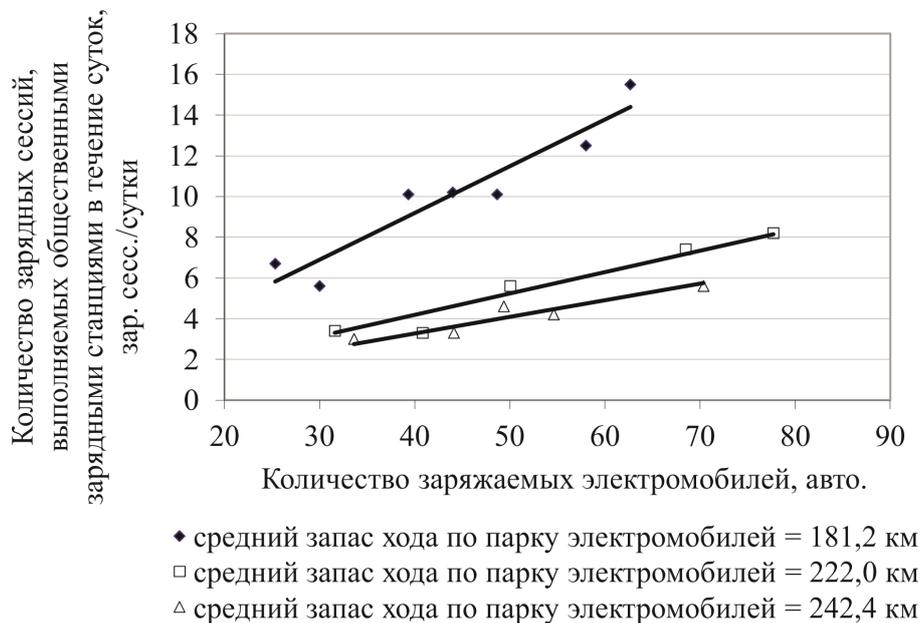


Рисунок 5. Закономерность изменения количества зарядных сессий, выполняемых общественными зарядными станциями в течение суток, от численности парка, использующего инфраструктуру

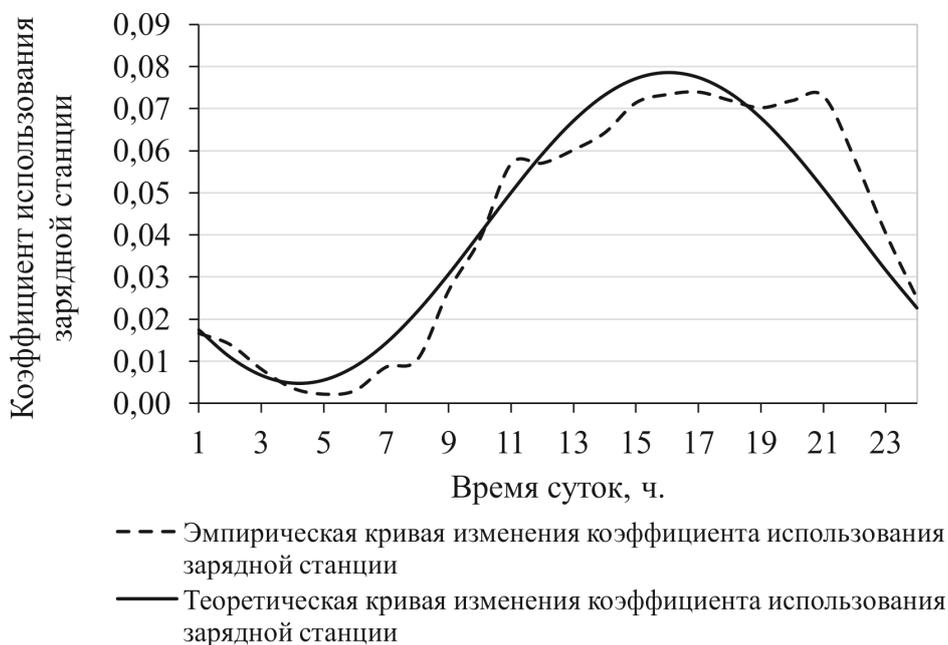


Рисунок 6. Кривые изменений коэффициента использования зарядной станции в течение суток

Обработка полученных данных с помощью корреляционно-регрессионного анализа позволила выявить статистические характеристики и параметры модели (2), описывающей закономерность изменения количества зарядных сессий, выполняемых

общественными зарядными станциями в течение суток от численности парка транспортных средств, использующих данную инфраструктуру (таблица 2).

Количество зарядных сессий, выполняемых общественными зарядными станциями в течение су-

ток, и численность парка электрических транспортных средств, использующих данную инфраструктуру, имеют высокую тесноту связей, оцененную с помощью коэффициента корреляции выше 0,9. Это подтверждают высокие значения, рассчитанного критерия Стьюдента. Разработанная модель (2) имеет высокую степень адекватности, о чем свидетельствуют значения дисперсионного отношения Фишера и средняя ошибка аппроксимации.

Полученные значения количества зарядных сессий, выполняемые в течение суток общественными зарядными станциями, необходимо распределить по времени в соответствии с коэффициентом использования, который был получен в результате обработки данных и вычисления вероятности совершения зарядной сессии по экспериментальным данным. В результате рассчитанные значения вероятности использования зарядной станции в разное время суток и стали коэффициентами использования. Для дальнейшего их применения в разрабатываемой имитационной модели по расчету оптимального количества зарядных станций необходимо построить гармоническую модель, описывающую изменение коэффициента использования зарядной станции во времени (рисунок 6).

Наибольшая вероятность совершения зарядной сессии характерна для периода с 14 до 17 часов. При этом в ночное время суток с 3 до 5 часов наблюдается наименьшая вероятность использования зарядной станции. Теоретическая кривая изменения коэффициента использования зарядной станции описывается с помощью гармонической модели вида (3) [4]:

$$K = 0,0417 + 0,0369 \cdot \cos(60 \cdot (11 \cdot t - 4,16)), \quad (3)$$

где

t – время суток, ч.

Теснота парных корреляционных связей, которая была оценена с помощью корреляционного отношения, составила 0,95 при уровне значимости 0,95, проверенном с помощью критерия Стьюдента. Проверка модели также показала ее адекватность, что подтверждено условием, при котором

дисперсионное отношение Фишера (11,4) превышает табличное значение (9,26). Средняя ошибка аппроксимации составила 8,03%, что не превышает 10...15%.

Полученные функции распределения, математические и гармонические модели описывают особенности формирования потока заявок на восстановление заряда тяговой аккумуляторной батареи электромобиля и будут являться основой разработки имитационной модели для расчета оптимального количества зарядных станций на территории городов в Российской Федерации.

Выводы

В ходе данного исследования была выявлена необходимость изучения особенностей формирования потока заявок на использование зарядных станций на территории городов Российской Федерации, что обусловлено высокой долей электромобилей, заряжаемых в частных домовладениях, а также техническими параметрами парка. В результате была получена функция распределения количества зарядных сессий, выполняемых зарядными станциями в течение суток. Она подчиняется закону Вейбулла, о чем свидетельствует полученный коэффициент вариации и рассчитанный критерий Пирсона. Математическое ожидание распределения количества зарядных сессий в течение суток было равно 5 зар. сесс./сутки. Однако при дальнейшем анализе данных было выявлено, что данное значение изменяется в зависимости от среднего запаса хода электромобилей в парке и их количества, поэтому были построены соответствующие математические модели и определены их статистические характеристики, которые подтвердили их адекватность. Для распределения количества зарядных сессий по времени суток был рассчитан коэффициент использования зарядной станции и построена гармоническая модель его изменения.

Полученные регрессионные и гармонические модели, а также функция распределения будут в дальнейшем использованы при разработке имитационной модели для расчета оптимального количества зарядных станций на территории городов Российской Федерации.

Литература

1. Асадов Д. Г. Обоснование эффективности технического сервиса мобильных электроагрегатов транспортного назначения при эксплуатации: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.03. – М., 2012. – 305 с.
2. Безродный А. А. Математические модели структур нефтепродуктообеспечения: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.18. – Саратов, 2004. – 153 с.
3. Вельниковский А. А. Методика обоснования региональной инфраструктуры автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (на примере Санкт-Петербурга): дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.10. – Санкт-Петербург, 2019. – 216 с.
4. Захаров Н. С. Моделирование процессов изменения качества автомобилей. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1999. – 127 с.

5. Кантор Ф. М., Юсупов И. Ю. Научные основы развития сети автозаправочных станций. – Ташкент: Издательство «ФАН» УзССР, 1981. – 112 с.
6. Коваленко В. Г., Кантор Ф. М., Хабаров С. Р. Системы обеспечения нефтепродуктами. – М.: Недра, 1982. – 237 с.
7. Легеца Г. В. Совершенствование технического сервиса мобильных электроагрегатов с автономным электроснабжением: дисс. ... канд. техн. наук.: 05.20.03. – М., 2009. – 180 с.
8. Тарасов, Р. В., Макарова Л. В., Бахтулова К. М. Оценка значимости факторов методом априорного ранжирования // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 4. – С. 46.
9. Халушаков З. Б., Ратмиров К. В. Красников В. К. Автозаправочные станции. – М.: ВНИИОЭНГ, 1968. – 104 с.
10. Farkas C., Prikler L. Stochastic modelling of EV charging at charging stations // International Conference on Renewable Energies and Power Quality: proceedings of conference (Spain, 28–30 March 2012). – Madrid, 2012. – P. 574.
11. Frade I., Ribeiro A., Goncalves G., Antunes A. Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal // Transportation Research Record. – 2011. – № 2. – P. 91–98.
12. Gimenez-Gaydou D. A., Ribeiro A. N., Gutierrez J., Antunes A.P. Optimal location of battery electric vehicle charging stations in urban areas: A new approach // International Journal of Sustainable Transport. – 2016. – № 10. – P. 393–405.
13. He S., Kuo Y.H., 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: Emerging Technologies. – 2016. – № 7. – P. 131–148.
14. Ghamami M., Nie Y., Zockaie A. Planning charging infrastructure for plug-in electric vehicles in city centers // International Journal of Sustainable Transport. – 2016. – № 10. – P. 343–353.
15. Mehrjerdi H., Hemmati R. Stochastic model for electric vehicle charging station integrated with wind energy // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2020. – № 37. – P. 157–177.
16. Cui S., Zhao H., Wen H., Zhang C. Locating multiple size and multiple type of charging station for battery electricity vehicles // Sustainability. – 2018. – № 10. – P. 32–47.
17. Wang Z., Liu P., Cui J., Xi Y., Zhang L. Research on quantitative models of electric vehicle charging stations based on principle of energy equivalence // Mathematical Problem In Engineering. – 2013. – № 3. – P. 959–965.

References

1. Asadov, D. G. (2012) *Obosnovanie effektivnosti tekhnicheskogo servisa mobil'nyh elektroagregatov transportnogo naznacheniya pri ekspluatatsii. Dokt. Diss* [Justification of the effectiveness of the technical service of mobile power generating units for transportation during operation. Doc. Diss.]. Moscow, 305 p.
2. Bezrodnyj, A. A. (2004) *Matematicheskie modeli struktur nefteproduktobespecheniya. Kand. Diss.* [Mathematical models of oil product supply structures, Cand. Diss.]. Saratov, 153 p.
3. Vel'nikovskij, A. A. (2019) *Metodika obosnovaniya regional'noj infrastruktury avtomobil'nyh gazonapolnitel'nyh kompressornyh stancij (na primere Sankt-Peterburga). Kand. Diss.* [Methodology for substantiating the regional infrastructure of automobile gas-filling compressor stations (on the example of St. Petersburg) Cand. Diss.]. St. Petersburg, 216 p.
4. Zaharov, N. S. (1999) *Modelirovanie processov izmeneniya kachestva avtomobilej* [Modeling processes of changing the quality of cars]. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University, 127 p.
5. Kantor, F. M., Yusupov, I. Yu. (1981) *Nauchnye osnovy razvitiya seti avtozapravochnyh stancij* [Scientific basis for the development of a network of gas stations]. Tashkent: FAN Publishing House of the Uzbek SSR, 112 p.
6. Kovalenko, V. G., Kantor, F. M., Habarov, S. R. (1982) *Sistemy obespecheniya nefteproduktami* [Oil supply systems]. Moscow: Nedra, 237 p.
7. Legeza, G. V. (2009) *Sovershenstvovanie tekhnicheskogo servisa mobil'nyh elektroagregatov s avtonomnym elektrosnabzheniem. Kand. Diss.* [Improving the technical service of mobile power units with autonomous power supply. Cand. Diss.]. Moscow, 180 p.
8. Tarasov, R. V., Makarova, L. V., Bahtulova, K. M. (2014) [Assessment of the significance of factors by a priori ranking method]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii* [Modern research and innovation]. Vol. 36. No 4, pp. 46. (In Russ.).
9. Halushakov, Z. B., Ratmirov, K. V. Krasnikov, V. K. (1968) *Avtozapravochnye stancii* [Gas stations]. Moscow: VNIIOENG, 104 p.
10. Farkas, C., Prikler, L. (2012) Stochastic modelling of EV charging at charging stations. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality: proceedings of conference (Spain, 28–30 March 2012)*. Madrid, 574 p.

11. Frade, I., Ribeiro, A., Goncalves, G., Antunes, A. (2011) Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal. *Transportation Research Record*. Vol. 2, pp. 91–98. (In Engl.).
12. Gimenez-Gaydou, D. A., Ribeiro, A. N., Gutierrea, J., Antunes, A. P. (2016) Optimal location of battery electric charging stations in urban areas: A new approach. *International Journal of Sustainable Transport*. Vol. 10, pp. 393–405. (In Engl.).
13. He, S., Kuo, Y. H., Wu D. (2016) 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: Emerging Technologies*. Vol. 67. No 7, pp. 131–148. (In Engl.).
14. Ghamami, M., Nie, Y., Zockaie, A. (2016) Planning charging infrastructure for plug-in electric vehicles in city centers. *International Journal of Sustainable Transport*. Vol. 4 No. 10. pp. 343–353. (In Engl.).
15. Mehrjerdi, H., Hemmati, R. (2020) Stochastic model for electric vehicle charging station integrated with wind energy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Vol. 116. No. 37, pp. 157–177. (In Engl.).
16. Cui, S., Zhao, H., Wen, H., Zhang, C. (2018) Locating multiple size and multiple type of charging station for battery electricity vehicles. *Sustainability*. Vol. 9. No. 10, pp. 32–47. (In Engl.).
17. Wang, Z., Liu, P., Cui, J., Xi, Y., Zhang, L. (2013) Research on quantitative models of electric vehicle charging stations based on principle of energy equivalence. *Mathematical Problem In Engineering*. Vol. 213. No 3, pp. 959–965. (In Engl.).

Информация об авторах:

Анастасия Дмитриевна Горбунова, аспирант, направление подготовки 23.06.01 Техника и технологии наземного транспорта, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

ORCID ID: 0000-0002-5083-2601, **Scopus Author ID:** 57194331023

e-mail: gorbunovaad94@gmail.com

Илья Александрович Анисимов, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры эксплуатации автомобильного транспорта Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

ORCID ID: 0000-0002-6712-9867, **Scopus Author ID:** 56106009200

e-mail: tkcc@list.ru

Статья поступила в редакцию: 09.04.2020; принята в печать: 17.06.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

Anastasia Dmitrievna Gorbunova, postgraduate student, training program 23.06.01 Engineering and technology of land transport, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

ORCID ID: 0000-0002-5083-2601, **Scopus Author ID:** 57194331023

e-mail: gorbunovaad94@gmail.com

Ilya Aleksandrovich Anisimov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Road Transport Exploitation, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

ORCID ID: 0000-0002-6712-9867, **Scopus Author ID:** 56106009200

e-mail: tkcc@list.ru

The paper was submitted: 09.04.2020.

Accepted for publication: 17.06.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.