

ТРАНСПОРТ

УДК 656.1

<https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-1-84>

МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ СООБЩЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА НА РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОБУСОМ

А. Д. Горбунова¹, О. Ю. Смирнова²

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

¹e-mail: Gorbunovaad94@gmail.com

²e-mail: Smirnovaaj@tyuiu.ru

Аннотация. Развитие парка электробусов, наблюдаемое в мире и, в частности, в Российской Федерации, приводит к возникновению новых научно-практических задач, которые требуют решения. Так в настоящее время при вводе электробусов в эксплуатацию на практике возникают проблемы с выбором рационального городского регулярного маршрута и организации на нем зарядной инфраструктуры. Для решения данной проблемы необходимо знать расход электроэнергии электробусом, который зависит от условий эксплуатации. В данной статье проведен анализ научных исследований в области моделирования расхода электроэнергии электробусом. Такой анализ и изучение опыта эксплуатации электробуса в г. Тюмени позволили выделить факторы, от которых зависит расход электроэнергии. В ходе исследования была сформулирована гипотеза: факторы, характеризующие условия эксплуатации на маршруте, могут быть учтены одним показателем «скорость сообщения». При этом до настоящего момента не было выявлено непосредственного влияния температуры окружающего воздуха на расход электроэнергии электробусом. Поэтому цель исследования заключается в изучении влияния скорости сообщения и температуры окружающего воздуха на расход электроэнергии электробусом на городском регулярном маршруте. Для достижения поставленной цели был проведен пассивный эксперимент, в ходе которого получены данные о функционировании электробусов, технических параметрах работы зарядных станций и температуре окружающего воздуха. Для проверки гипотезы исходный объем экспериментальной информации обработан с помощью методов статистической обработки данных. Установлено, что снижение скорости сообщения вызывает рост расхода электроэнергии электробусом. В ходе анализа влияния температуры окружающего воздуха на рассматриваемый выходной параметр выявлено, что при ее отклонении от значения, равного +4 °С, наблюдается увеличение расхода электроэнергии электробусом. И при отклонении от этого значения наблюдается рост расхода электроэнергии электробусом. В результате установленные закономерности влияния скорости сообщения и температуры окружающего воздуха на расход электроэнергии электробусом и их математические модели станут основой в ходе дальнейших исследований для разработки методики нормирования расхода электроэнергии электробусом на городском регулярном маршруте.

Ключевые слова: электробус, расход электроэнергии электробусом, скорость сообщения, температура окружающего воздуха, параметры маршрута.

Для цитирования: Горбунова А. Д., Смирнова О. Ю. Модель влияния скорости сообщения и температуры окружающего воздуха на расход электроэнергии электробусом // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2022. – № 1. – С. 84–92, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-1-84>.

MODEL OF THE INFLUENCE OF THE SPEED OF COMMUNICATION AND AMBIENT TEMPERATURE ON THE ELECTRIC POWER CONSUMPTION OF AN ELECTRIC BUS

A. D. Gorbunova¹, O. Yu. Smirnova²

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

¹e-mail: Gorbunovaad94@gmail.com

²e-mail: Smirnovaaj@tyuiu.ru

Abstract. The development of the electric bus fleet, observed in the world and, in particular, in the Russian Federation, leads to the emergence of new scientific and practical problems that need to be addressed. So, at present, when electric buses are put into operation, in practice, problems arise with the choice of a rational urban regular route and the organization of charging infrastructure on it. To solve this problem, you need to know the power consumption of an electric bus, which depends on the operating conditions. This article analyzes scientific research in the field of modeling electricity consumption by an electric bus. Such an analysis and study of the experience of operating an electric bus in Tyumen made it possible to single out the factors on which electricity consumption depends. In the course of the study, a hypothesis was formulated: the factors characterizing the operating conditions on the route can be taken into account by one indicator «speed of communication». At the same time, until now, no direct influence of the ambient temperature on the power consumption of an electric bus has been revealed. Therefore, the aim of the study is to study the effect of traffic speed and ambient temperature on the electricity consumption of an electric bus on a regular urban route. To achieve this goal, a passive experiment was carried out, during which data was obtained on the functioning of electric buses, the technical parameters of the charging stations and the ambient temperature. To test the hypothesis, the initial amount of experimental information was processed using statistical data processing methods. It was found that a decrease in the speed of communication causes an increase in the consumption of electricity by an electric bus. During the analysis of the influence of the ambient air temperature on the considered output parameter, it was revealed that when it deviates from the value equal to + 4 °C, an increase in the consumption of electricity by the electric bus is observed. As a result, the established regularities of the influence of the speed of communication and the ambient air temperature on the electricity consumption of an electric bus and their mathematical models will become the basis for further research for the development of a methodology for rationing electricity consumption by an electric bus on a regular city route.

Key words: electric bus, energy consumption by electric bus, shipping speed, ambient temperature, parameters of route.

Cite as: Gorbunova, A. D., Smirnova, O. Yu. (2022) [Model of the influence of the speed of communication and ambient temperature on the electric power consumption of an electric bus]. *Intellect. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 1, pp. 84–92, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-1-84>.

Введение

Реализация Транспортной стратегии развития Российской Федерации на период до 2030 г., одной из целей которой является снижение вредного воздействия на окружающую среду путем увеличения доли альтернативных видов топлива в общем топливопотреблении до 35%¹, обуславливает повышение экологичности автотранспортного комплекса. В результате в парке городского пассажирского общественного транспорта наблюдается рост электробусов. В мире на 1 января 2021 г. их количество достигло 16% от общей численности эксплуатируемых автобусов². В Российской Федерации на 1 июля 2021 г. данное значение составило более 600 ед.³ Однако наиболее крупный парк рассматриваемых транспортных средств функционирует в Москве и составляет 96% от общего количества эксплуатируемых электробусов. Их неравномерное распределение обусловлено высокой стоимостью электробусов и организацией зарядной инфраструктуры, а также техническими

характеристиками существующих моделей, которые ограничивают их эффективную эксплуатацию на практике. К ним относят небольшой запас хода и значительную продолжительность восстановления заряда тяговой аккумуляторной батареи. На основе существующих технологий производства систем питания электробуса найдено соотношение между указанными значениями (70–80 км запаса хода при средней длительности заряда тяговой аккумуляторной батареи 6–20 минут), которое позволяет восстанавливать заряд аккумулятора во время движения на маршруте. На практике фактическое время технологического перерыва превышает значения, указанные производителем, вследствие недостаточной мощности при подключении зарядных станций. В результате это приводит к увеличению простоев электробусов и снижению эффективности их эксплуатации и сложности выбора местоположения зарядных станций на практике. Данные проблемы могут быть решены путем поиска согласования специальных

¹ Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]: распоряжение правительства РФ от 22 ноября 2008г. №1734-р // Министерство транспорта Российской Федерации. Цели и задачи. Стратегии развития транспортного комплекса. Транспортная стратегия. – Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/ministry/targets/187/191/documents> (дата обращения: 02.12.2021).

² IEA. Global EV Outlook 2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021?mode=overview> (дата обращения: 30.11.2021).

³ РБК. Росстат назвал долю электробусов в общественном транспорте страны [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rbc.ru/society/28/07/2021/61017ae79a79473cbab458cc> (дата обращения: 30.11.2021).

перерывов, организованных в соответствии с действующим режимом труда и отдыха водителей, с технологическими. Следовательно, необходимо знать фактический расход электроэнергии электробусами, который зависит от условий его эксплуатации.

В настоящее время расход электроэнергии электробусом может быть рассчитан на основе данных о ёмкости тяговых аккумуляторных батарей и запаса хода, предоставленных производителем, что в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами⁴ может быть названо как удельная норма расхода электроэнергии электробусом. Однако эти значения отличаются от фактических, что обусловлено отсутствием учета условий эксплуатации на расход электроэнергии электробусом на маршруте.

Таким образом, на основе анализа сложившейся ситуации в области эксплуатации электробусов можно сделать вывод о необходимости разработки процедур нормирования расхода электроэнергии электробусом на городском регулярном маршруте с учетом условий эксплуатации для выбора рационального городского регулярного маршрута и расположения на нем зарядной инфраструктуры. Это позволит повысить эффективность эксплуатации электробусов в результате согласования технологических и специальных перерывов в работе транспортных средств.

Обзор литературы

В настоящее время моделирование расхода электроэнергии электробусом является одной из важнейших научно-практических задач в области эксплуатации рассматриваемых транспортных средств. Их разработка направлена на обоснование оптимального расположения зарядной инфраструктуры на маршруте, на создание стратегического плана перехода к электробусам, на совершенствование существующих систем накопления энергии и тяговых электродвигателей.

Разработанные модели расхода электроэнергии электробусом можно разделить на два типа в соответствии с информацией, которая используется для построения:

– модели, учитывающие технические параметры функционирования внутренних систем электробуса, такие как температура тяговой аккумуляторной батареи, сила тока, напряжение электродвигателя и др., определяемые мгновенной скоростью движения транспортного средства или характеристиками работы зарядной станции [1, 3, 9, 13];

– модели, учитывающие дорожные и транспортные условия эксплуатации [5–8, 10–12, 14–15].

При выборе рационального городского регулярного маршрута для ввода электробуса в эксплуатацию интерес представляет второй тип моделей [8]. В предыдущих работах в качестве исходных факторов, влияющих на расход электроэнергии электробусом, учитывают количество остановочных пунктов, среднюю длину перегонов между ними и время простоя для посадки и высадки пассажиров; среднюю скорость движения на перегонах; длину маршрута [5–8, 10–12, 14–15]. Их одновременный учет при расчете расхода электроэнергии электробусом является затруднительным, что обуславливает необходимость выбора существенно важных из них или разработки комплексного показателя. В ходе анализа работ в области нормирования расхода топлива автобусами с двигателем внутреннего сгорания было выявлено, что таковым может стать скорость сообщения – скорость движения транспортного средства на маршруте, которая учитывает задержки на пересечениях улично-дорожной сети и простои на промежуточных остановочных пунктах для посадки и высадки пассажиров. Важность данного фактора наряду со средним дневным пробегом отмечена в работе Л. Б. Миротина и др. при нормировании маршрутного расхода дизельного топлива автобусами в г. Москве [2].

Существующие модели расхода электроэнергии электробусом в качестве факторов также учитывают работу отопителей и системы кондиционирования, которая вводится в модель путем расчета разности температур окружающего внешнего воздуха и в салоне транспортного средства [4]. Однако разработанные подходы не рассматривают непосредственного влияния температуры окружающего воздуха на расход электроэнергии электробусом. Данный фактор оказывает воздействие на рассматриваемый выходной параметр в результате включения в работу системы термостатирования батарей для сохранения их ресурса, а также изменения параметров, определяющих количество энергии, затрачиваемой на движение транспортного средства.

Выполненный анализ позволил сформулировать цель исследования – изучение влияния скорости сообщения и температуры окружающего воздуха на расход электроэнергии электробусом на городском регулярном маршруте.

Теоретические исследования

В работе предполагается оценивать совокупность параметров маршрута, представленных на рис. 1, с помощью скорости сообщения.

⁴ О введении в действие методических рекомендаций по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования [Электронный ресурс]: распоряжение Минтранса РФ от 18.04.2013 № НА-37-р // Консультант Плюс. Документы. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145930/ (дата обращения: 12.11.2021).

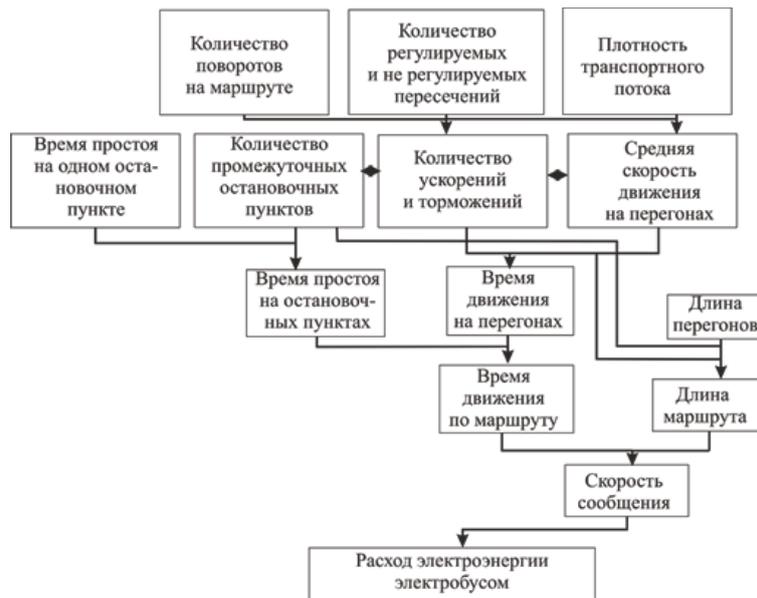


Рисунок 1. Схема влияния параметров маршрута на скорость сообщения и расход электроэнергии электробусом

Источник: разработано авторами

Влияние данного фактора на расход электроэнергии электробусом можно установить на основе предварительной оценки воздействия отдельных параметров маршрута. В ходе анализа ранее выполненных научных исследований установлено, что увеличение количества остановочных пунктов, времени простоя на них, снижение длины перегона приводят к снижению скорости сообщения на маршруте и вызывают рост расхода электроэнергии электробусом [10, 11].

Снижение скорости сообщения связано с увеличением количества торможения и ускорений, которые вызывают повышение крутящего момента при увеличении частоты оборотов двигателя. Это приводит к росту потребляемой мощности двигателем в данные моменты времени, что обуславливает рост расхода электроэнергии электробусом. При этом снижение скорости сообщения приводит к снижению средней скорости движения транспортного средства на перегоне, что уменьшает количество возвращаемой энергии в результате рекуперации во время торможений. Для математического описания закономерности влияния скорости сообщения на расход электроэнергии электробусом установлено, что необходимо учитывать наличие асимптот, которые позволят учесть то, что при скорости сообщения, стремящейся к бесконечности, расход электроэнергии не может быть равен нулю, а минимальная скорость сообщения не приводит к максимальному значению выходного параметра.

На основании выше представленного анализа закономерности и механизма влияния скорости сообщения на расход электроэнергии электробусом предложена однофакторная математическая модель (1):

$$q_{эв} = \frac{a}{v_{cc}}, \text{ при } v_{cc} = (10; 30], \quad (1)$$

где

a – параметр модели, кВт;

v_{cc} – скорость сообщения, км/ч.

В качестве фактора, учитываемого при расчете расхода электроэнергии электробуса, в настоящем исследовании также рассматривается температура окружающего воздуха, так как она оказывает влияние на параметры работы транспортного средства. Так понижение или повышение температуры окружающего воздуха приводит к безвозвратному снижению ёмкости тяговых аккумуляторных батарей. Поэтому современные электробусы, эксплуатируемые в Российской Федерации, оборудованы системой термостагирования батарей, которая позволяет поддерживать постоянно их температуры для сохранения ресурса. В результате изменение температуры окружающего воздуха влияет на работу данной системы, которая потребляет энергию тяговых аккумуляторных батарей. При этом на количество потребляемой энергии влияют параметры, определяющие тяговое усилие на ведущих колесах. Так понижение температуры окружающего воздуха вызывает рост коэффициента сопротивления качению и плотности воздуха, которые приводят к увеличению расхода электроэнергии электробусом. При повышении температуры окружающего воздуха дополнительно оказывает влияние работа установки «климат-контроль», которая обеспечивает комфортные условия в салоне транспортного средства. В результате отклонение температуры окружающего воздуха от значения, которому соответствует

минимум выходного параметра, приводит к увеличению расхода электроэнергии электробусом. Математически данная закономерность может быть описана с помощью формулы (2):

$$q_{ЭЭt} = q_{ЭЭvmin} + c \times (t - t_0)^2, \quad (2)$$

где

$q_{ЭЭvmin}$ – минимальный расход электроэнергии электробусом при заданном значении скорости сообщения, кВт·ч/км;

c – параметр модели, кВт·ч/(км °C²);

t – фактическая температура окружающего воздуха, °C;

t_0 – оптимальная температура окружающего воздуха по расходу электроэнергии электробусом, °C.

Для подтверждения выдвинутых предположений о механизме влияния скорости сообщения и температуры окружающего воздуха на расход электроэнергии электробусом и в виде математических моделей были проведены экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования

Для достижения цели исследования был проведен пассивный эксперимент, который предусматривал сбор данных о функционировании электробусов, технических параметрах зарядных сессий и изменении температуры окружающего воздуха на маршруте. Для анализа были выбраны 3 городских регулярных маршрута, на которых

функционируют электробусы, в г. Москве и 1 – в г. Тюмени. Выбор был проведен с учетом условия возможности обслуживания зарядными станциями электробусов, функционирующих только на рассматриваемом маршруте. В результате сопоставления графиков движения электробусов и времени начала зарядных сессий они были присвоены транспортным средствам. При этом были выдвинуты аксиомы о том, что в начале смены заряд тяговой аккумуляторной батареи составляет 100%, а для выполнения зарядной сессии электробусы могут сойти с маршрута только на конечных остановочных пунктах. Это позволило рассчитать расход электроэнергии электробусом на городском регулярном маршруте при скорости сообщения от 11 до 22 км/ч для г. Москвы и от 24 до 27 км/ч для г. Тюмени и температуре окружающего воздуха от –27 до +36 °C. Предварительно было проведено сопоставление данных, полученных для различных городов путем построения и оценки выявляемых закономерностей для каждого из маршрутов, что позволило в ходе дальнейшего исследования использовать данные совместно. Объем выборки составил 3065 значений, которые были разделены на 144 интервала. Для каждого из них были получены значения математического ожидания скорости сообщения, температуры окружающего воздуха и расхода электроэнергии электробусом.

По полученным значениям построены закономерности влияния скорости сообщения и температуры окружающего воздуха на расход электроэнергии электробусом (рис. 2 и рис. 3, соответственно).

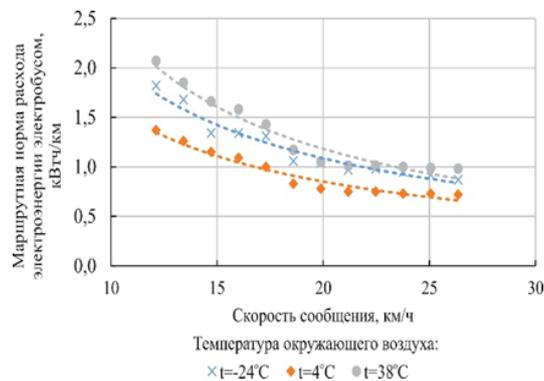


Рисунок 2. Влияние скорости сообщения на расход электроэнергии электробусом на городском регулярном маршруте

Источник: разработано авторами

Увеличение скорости сообщения приводит к снижению расхода электроэнергии электробусом на городском регулярном маршруте на 0,65–1,09 кВт·ч/км (47–53%). При этом минимальное изменение расхода электроэнергии электробусом по скорости сообщения наблюдается при температуре окружающего воздуха, которой соответствует минимальное значение рассматриваемого выход-

ного параметра. Отклонение температуры окружающего воздуха от данного значения приводит к увеличению диапазона варьирования выходного параметра.

Для оценки тесноты связи скорости сообщения и расхода электроэнергии электробусом было рассчитано корреляционное отношение, представленное в таблице 1.

Таблица 1. Параметры и статистические характеристики модели (4)

Температура окружающего воздуха, °С	Параметр модели a , кВт	Корреляционное отношение η	Критерий Стьюдента $t_{0,95}$	Критерий Стьюдента t	Средняя ошибка аппроксимации, %	Дисперсионное отношение Фишера F	Критерий Фишера $F_{0,95}$
-24	21,59	0,97	2,18	13,64	4,91	19,59	2,82
4	16,84	0,98	2,18	14,48	4,53	21,98	2,82
38	24,06	0,97	2,18	12,98	5,98	17,84	2,82

Источник: разработано авторами

Для математического описания полученных закономерностей были рассчитаны параметры моде-

ли (1), а также дисперсионное отношение Фишера, которое позволило оценить её адекватность.

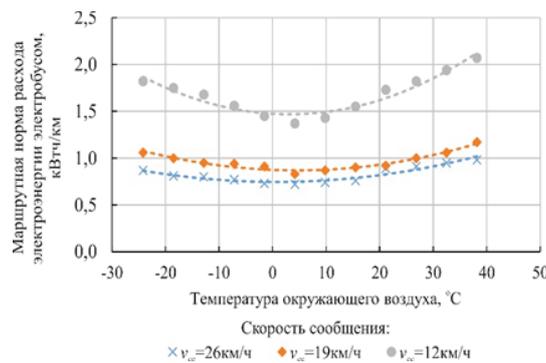


Рисунок 3. Влияние температуры окружающего воздуха на расход электроэнергии электробусом на городском регулярном маршруте

Источник: разработано авторами

При температуре окружающего воздуха, равной +4 °С, наблюдается минимальный расход электроэнергии электробусом при различных скоростях сообщения. Отклонение рассматриваемого фактора от указанного значения приводит к увеличению расхода электроэнергии электробусом на 0,26–0,70 кВт·ч/км (27–34%). При увеличении скорости сообщения диапазон варьирования расхода электроэнергии электробусом по температуре окружающего воздуха снижается. Это обусловлено тем, что при снижении скорости сообщения увеличивается доля простоев, в процессе которых влияние режимов работы потребителей электрической энергии, зависящих от температуры окру-

жающего воздуха, значительнее, чем параметров, определяющих затраты электроэнергии на движение транспортного средства. В результате при низких скоростях сообщения наблюдается небольшое увеличение диапазона варьирования расхода электроэнергии электробусом по температуре окружающего воздуха.

Как ранее было указано, полученные закономерности можно описать с помощью модели (2), для которой по экспериментальным данным с помощью метода наименьших квадратов были рассчитаны параметры и оценена её адекватность на основе сравнения дисперсионного отношения и критерия Фишера, что представлено в таблице 2.

Таблица 2. Параметры и статистические характеристики модели (5)

Скорость сообщения, км/ч	Параметры модели		Корреляционное отношение η	Критерий Стьюдента $t_{0,95}$	Критерий Стьюдента t	Средняя ошибка аппроксимации, %	Дисперсионное отношение Фишера F	Критерий Фишера $F_{0,95}$
	$Q_{\text{эдр}}^{\text{min}}$	c						
26	0,74	$2,2 \cdot 10^{-4}$	0,89	2,18	6,32	3,30	5,00	2,82
19	0,87	$2,4 \cdot 10^{-4}$	0,97	2,18	12,66	1,62	17,03	2,82
12	1,46	$5,1 \cdot 10^{-4}$	0,96	2,18	10,29	2,94	11,59	2,82

Источник: разработано авторами

Полученные результаты корреляционного отношения (выше 0,89) свидетельствуют о высокой силе связи факторов и выходного параметра моделей. Значимость данных значений подтверждается превышением расчетного значения критерия Стьюдента табличного. Превышение значений дисперсионного отношения Фишера табличного значения показывает адекватность моделей.

Полученные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о высокой силе связи скорости сообщения и температуры окружающего воздуха с расходом электроэнергии электробусом. Сформулированные предположения о закономерностях их влияния на рассматриваемый выходной параметр в виде математических моделей были подтверждены путем сравнения теоретически и экспериментально полученных результатов. Средняя ошибка аппроксимации не превысила 6%. В результате выявленные закономерности позволяют подтвердить выдвинутую гипотезу о необходимости учета скорости сообщения и температуры окружающего воздуха при нормировании расхода электроэнергии электробусом.

Заключение

Анализ ранее проведенных работ позволил выявить, что в качестве основных факторов, учитыва-

емых в модели расхода электроэнергии электробусом, рассматриваются параметры маршрута. Авторами настоящего исследования было предложено оценивать данные значения с помощью скорости сообщения. Установлено также, что расход электроэнергии электробусами зависит от температуры окружающего воздуха. В результате обработки данных экспериментальных исследований было подтверждено предположение о том, что расход электроэнергии электробусом увеличивается при снижении скорости сообщения. Температура окружающего воздуха оказывает более сложное влияние на рассматриваемый выходной параметр. В данном случае наблюдается такое значение данного фактора, при котором расход электроэнергии электробусом минимальный, и отклонение температуры окружающего воздуха в сторону положительных или отрицательных величин от него приводит к увеличению выходного параметра. Для математического описания полученных закономерностей предложены модели, адекватность которых подтверждена в результате сравнения дисперсионного отношения и критерия Фишера с вероятностью 0,95.

Полученные результаты будут в дальнейшем применены в качестве основы при разработке методики нормирования расхода электроэнергии электробусами на регулярном городском маршруте.

Литература

1. Косицын Б. Б. Экспериментальное исследование энергоэффективного закона управления движением электробуса на городском маршруте // Журнал автомобильных инженеров. – 2017. – № 5. – С. 15–23.
2. Методика оперативного определения норм расхода топлива городскими автобусами с учетом сложности маршрута движения/ А. П. Болдин [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2018. – № 6. – С. 22–26.
3. Оспанбеков Б. К., Голубчик Т. В., Сидоров К. М. Технологические аспекты зарядной инфраструктуры для электромобилей // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 4. – С. 35–38.
4. Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses / Basma H. et al // Energy. – 2020. – № 207. – 118241. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118241>.
5. Transitioning to zero-emission bus fleets: state of practice of implementations in the United States / Deliali A. et al // Transport Reviews. – 2021. – № 2. – P. 164–191.
6. Gabsalikhova L., Sadygova G., Almetova Z. Activities to convert the public transport fleet to electric buses // Transportation Research Procedia. – 2018. – № 36. – P. 669–675.
7. 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. – 2018. – № 230. – P. 344–356.
8. Krawiec K. Vehicle cycle hierarchization model to determine the order of battery electric bus deployment in public transport // Transport Problems. – 2021. – № 1. – P. 99–112.
9. Lin K. Ch., Lin Ch. N., Ying J. J. Construction of analytical models for driving energy consumption of electric buses through machine learning // Applied Sciences. – 2020. – № 10(17). – 6088. – DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app10176088>.
10. Pamula T., Pamula W. Estimation of the energy consumption of battery electric buses for public transport network using real-world data and deep learning // Energies. – 2020. – № 13(9). – 2340. – DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en13092340>.
11. Design methodology for the electrification of urban bus lines with battery electric buses / Tesar M. et al // Transportation Research Procedia. – 2020. – № 48. – P. 2038–2055.
12. Torabi S., Bellone M., Wahde M. Energy Minimization for an electric bus using a genetic algorithm // European Transport Research Review. – 2020. – № 12. – 12544-019-0393-1 – DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0393-1>.

13. Development and validation of energy demand uncertainty model for electric city buses / Vepsalainen J. et al // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2018. – № 63. – P. 347–361.

14. Examining influential factors on the energy consumption of electric and diesel buses: A data-driven analysis of large-scale public transit network in Beijing / Xiaolei M. et al // *Energy*. – 2021. – № 216. – 119196 – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119196>.

15. Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions / Zhou B. et al // *Energy*. – 2016. – № 96(C). – P. 603–613.

References

1. Kositsyn, B. B. (2017) [Experimental study of the energy efficient law of control of the movement of an electric bus on an urban route]. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers]. Vol. 5 (106), pp. 15–23. (In Russ.).

2. Boldin, A. P. et al (2018) [Methodology for the rapid determination of fuel consumption rates for city buses, taking into account the complexity of the route]. *Avtomobil'naya promyshlennost'* [Automotive Industry]. Vol.6, pp. 22–26. (In Russ.)

3. Ospanbekov, B. K., Golubchik, T. V., Sidorov, K. M. (2016) [Technological aspects of charging infrastructure for electric vehicles]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. Vol. 4, pp. 35–38. (In Russ.).

4. Basma, H. et al (2020) Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses. *Energy*. Vol. 207, 118241. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118241>. (In Eng.).

5. Deliali, A. et al (2021) Transitioning to zero- emission bus fleets: state of practice of implementations in the United States. *Transport Reviews*. Vol. 41. No 2, pp. 164–191. – DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1800132>. (In Eng.).

6. Gabsalikhova, L., Sadygova, G., Almetova, Z. (2018) Activities to convert the public transport fleet to electric buses. *Transportation Research Procedia*. Vol. 36., pp. 669–675. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.127>. (In Eng.).

7. Gallet, M., Massier, T., Hamacher, T. (2018) Estimation of the energy demand of electric buses based on real world data for large-scale public transport networks. *Applied Energy*. Vol. 230, pp. 344–356. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.086>. (In Eng.).

8. Krawiec, K. (2021) Vehicle cycle hierarchization model to determine the order of battery electric bus deployment in public transport. *Transport Problems*. Vol. 16. No 1, pp. 99–112. – DOI: 10.21307/tp-2021-009. (In Eng.).

9. Lin, K. Ch., Lin, Ch. N., Ying, J. J. (2020) Construction of analytical models for driving energy consumption of electric buses through machine learning. *Applied Sciences*. Vol.17. No 10, 6088. – DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app10176088>. (In Eng.).

10. Pamula, T., Pamula, W. (2020) Estimation of the energy consumption of battery electric buses for public transport network using real-world data and deep learning. *Energies*. Vol. 13, No 09, 2340. – DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en13092340>. (In Eng.).

11. Tesar, M. et al (2020) Design methodology for the electrification of urban bus lines with battery electric buses. *Transportation Research Procedia*. Vol. 48. No 4, pp. 2038–2055. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.264>. (In Eng.).

12. Torabi, S., Bellone, M., Wahde, M. (2020) Energy Minimization for an electric bus using a genetic algorithm. *European Transport Research Review*. Vol.126. No 12, 12544-019-0393-1. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0393-1>. (In Eng.).

13. Vepsalainen, J. et al (2018) Development and validation of energy demand uncertainty model for electric city buses. *Transportation Research Part D*. Vol. 63. No 6, pp. 347–361. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.06.004>. (In Eng.).

14. Xiaolei, M. et al (2021) Examining influential factors on the energy consumption of electric and diesel buses: A data-driven analysis of large-scale public transit network in Beijing. *Energy*. Vol. 26. No 2, 119196. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119196>. (In Eng.).

15. Zhou, B. et al (2016) Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. *Energy*. Vol. 27. No 9, pp. 603–613. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.041>. (In Eng.).

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

e-mail: Gorbunovaad94@gmail.com

Ольга Юрьевна Смирнова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта строительных и дорожных машин, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

ORCID ID: 0000-0001-8951-6449

e-mail: Smirnovaoj@tyuiu.ru

Вклад соавторов:

Горбунова А. Д. – анализ ранее выполненных работ, выявление закономерностей влияния скорости сообщения и температуры окружающего воздуха на расход электроэнергии электробусом, разработка математических моделей и расчет их статистических характеристик.

Смирнова О. Ю. – проверка механизма влияния скорости сообщения и температуры окружающего воздуха на расход электроэнергии электробусом, проверка математических моделей и их статистических характеристик.

Статья поступила в редакцию: 11.12.2021; принята в печать: 09.02.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

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

ORCID ID: 0000-0002-5083-2601

e-mail: Gorbunovaad94@gmail.com

Olga Yurievna Smirnova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the automobile transport, construction and road machine department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

ORCID ID: 0000-0001-8951-6449

e-mail: Smirnovaoj@tyuiu.ru

Contribution of the authors:

Gorbunova A. D. – analysis of previously performed researches, identification of patterns of influence of shipping speed and ambient temperature on electric power consumption by an electric bus, development of mathematical models and calculation of their statistical characteristics.

Smirnova O. Yu. – checking the mechanism of the influence of the shipping speed and the ambient air temperature on the power consumption of an electric bus, checking the mathematical models and their statistical characteristics.

The paper was submitted: 11.12.2021.

Accepted for publication: 09.02.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.