

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-48-59>

УДК 629.341

## Оценка влияния транспортных и природно-климатических факторов на уровень расхода электроэнергии электробусов в условиях городской среды

Канд. техн. наук, доц. Е. М. Чикишев<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, доц. Д. В. Капский<sup>2)</sup>, С. С. Семченков<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Тюменский индустриальный университет (Тюмень, Российская Федерация),

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023

Belarusian National Technical University, 2023

**Реферат.** В статье рассматривается вопрос расширения использования электробусов при перевозке пассажиров регулярными городскими маршрутами, которые способствуют значительному снижению общего загрязнения окружающей среды автомобильным транспортом. Проанализированы законодательные акты, подтверждающие государственную поддержку развития данной отрасли. Приведены результаты ездовых циклов электробусов АКСМ-Е321 и АКСМ-Е433 в Минске, электробусов ЛиАЗ-6274.00 и КАМАЗ-6282 в Тюмени и Москве. Выявлена корреляция удельного среднемесячного расхода электроэнергии и среднемесячной температуры окружающего воздуха. Установлено, что наиболее весомым фактором, влияющим на расход электроэнергии электробуса, для Москвы являются транспортные условия, для Тюмени – температура окружающего воздуха. Результаты исследований позволяют планировать использование электробусов на различных городских маршрутах на основе пробегов без подзарядки. Это может позволить разработать рекомендации по применению исследуемых марок электробусов на маршрутах определенной протяженностью и сложностью.

**Ключевые слова:** электробус, городской транспорт, пассажирские перевозки, низкие температуры, условия эксплуатации

**Для цитирования:** Чикишев, Е. М. Оценка влияния транспортных и природно-климатических факторов на уровень расхода электроэнергии электробусов в условиях городской среды / Е. М. Чикишев, Д. В. Капский, С. С. Семченков // *Наука и техника*. 2023. № 1. С. 48–59. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-48-59>

## Assessment of Transport, Natural and Climatic Factors Influence on the Level of Electric Buses Energy Consumption in Urban Environment

Е. М. Chikishev<sup>1)</sup>, D. V. Kapskiy<sup>2)</sup>, S. S. Semchenkov<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Industrial University of Tyumen (Tyumen, Russian Federation),

<sup>2)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper considers the issue of expanding the use of electric buses when transporting passengers on regular urban routes, which contribute to a significant reduction in the overall environmental pollution by road transport. Legislative acts

---

### Адрес для переписки

Чикишев Евгений Михайлович  
Тюменский индустриальный университет  
ул. Володарского, 38,  
625000, г. Тюмень, Российская Федерация  
Тел.: +734 52 53-95-40  
chikishev\_e@mail.ru

### Address for correspondence

Chikishev Evgeniy M.  
Industrial University of Tyumen  
38, Volodarskogo str.,  
625000, Tyumen, Russian Federation  
Tel.: +734 52 53-95-40  
chikishev\_e@mail.ru

confirming the state support for the development of this industry are analyzed. The results of driving cycles of electric buses AKSM-E321 [AKSM-E321] and AKSM-E433 [AKSM-E433] in Minsk, electric buses ЛиАЗ-6274.00 [LiAZ-6274.00] and КАМАЗ-6282 [KAMAZ-6282] in Tyumen and Moscow are presented. The correlation of the specific average monthly electricity consumption and the average monthly ambient temperature is revealed. It has been established that for Moscow, the most significant factor influencing the electric bus power consumption are transport conditions. The ambient air temperature was identified as a key factor for the city of Tyumen. The research results make it possible to plan the use of electric buses on various urban routes based on runs without recharging. This may allow us to develop recommendations for the use of the studied brands of electric buses on routes of a certain length and complexity.

**Keywords:** electric bus, urban transport, passenger transportation, low temperatures, operation conditions

**For citation:** Chikishev E. M., Kapskiy D. V., Semchenkov S. S. (2023) Assessment of Transport, Natural and Climatic Factors Influence on the Level of Electric Buses Energy Consumption in Urban Environment. *Science and Technique*. 22 (1), 48–59. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-48-59> (in Russian)

## Введение

В конце XX в. большинство стран мира завили о необходимости сокращения выбросов парниковых газов от деятельности человека в атмосферу. И первым глобальным документом, который регулировал данную проблему, являлся Киотский протокол, принятый в декабре 1997 г. в Японии и вступивший в силу в феврале 2005 г. С этого времени государства начали ужесточать требования в том числе к выбросам вредных веществ с отработавшими газами автомобилей, так как они являются одними из основных источников загрязнения окружающей среды, которые потребляют около 50 % от всей добываемой в мире нефти (продукты ее переработки бензин, дизельное топливо, моторное масло и др.).

Таким образом, во многих странах, кроме улучшения качества традиционных топлив – бензина и дизеля, наметилась тенденция к применению на транспорте альтернативной энергетики – сжиженного нефтяного газа, природного газа, электричества и др. Данному вопросу посвящено много исследований [1–17]. Начиная с 2014 г. в мире наблюдается стабильный рост электромобилей всех типов (PHEV и BEV). Если в 2014 г. их было менее 1 млн шт., то по итогам 2021 г. уже свыше 16,5 млн шт. [18].

В 2021 г. лидерами по продажам колесного электротранспорта стали Китай (3,3 млн шт.), Европейский союз (2,3 млн шт.) и Соединенные Штаты Америки (630 тыс. шт.). По состоянию на 1 января 2022 г. в Республике Беларусь было зарегистрировано 2538 электромобилей (0,08 % всех легковых автомобилей) и 109 электробусов (0,26 % всех автобусов). Российская Федерация пока значительно уступает по доле электромобилей (как по общему парку, так и по

продажам). В РФ за 2021 г. их было продано всего около 2250 шт.

Автомобильные заводы, имеющие самый большой объем продаж электротранспорта, – Tesla (США), SAIC (Китай) и Volkswagen (Германия). Наибольший парк электромобилей (BEV) от общего парка наблюдается в Норвегии (49 %), Исландии (19 %) и Швеции (8 %) [18]. Необходимо отметить, что в данную статистику не входят грузовые электромобили и электробусы.

В мире производство электробусов представлено такими компаниями, как: ADL (Шотландия), BYD (Китай), De Lijn (Бельгия), Ebusco (Голландия), Heuliez (Франция), Irizar (Испания), «Белкоммунмаш» (Республика Беларусь), МАЗ (Республика Беларусь), Proterra (США), Solaris (Польша), VDL Bus & Coach (Голландия), Volvo (Швеция), Yutong (Китай) и др. Лидером по производству и внедрению в городские сети электробусов со значительным отрывом является Китай. Страна производит более 90 % от общемирового парка [19].

Серийный выпуск электробусов в Республике Беларусь начат в 2017 г. и налажен на двух ведущих предприятиях. На сегодняшний день белорусский производитель предлагает электробусы с ультрабыстрой зарядкой (далее – ОС), быстрой зарядкой (далее – FC) и ночной зарядкой (далее – ОНС). В настоящее время взят устойчивый курс на развитие широкого применения транспортных средств с электрическим приводом. Действующими государственными программами Республики Беларусь предусматривается ряд мероприятий, направленных на увеличение доли транспортных средств с электрическим приводом как в области перевозок маршрутным пассажирским транспортом, так и в городах в целом. Следует

отметить, что триггером такого интенсивного применения транспортных средств с электрическим приводом в стране стали развитие атомной энергетики, строительство и ввод в эксплуатацию Белорусской АЭС. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 09.04.2021 № 213 (в ред. от 20.04.2022) была утверждена Комплексная программа развития электротранспорта на 2021–2025 гг. Реализация данной программы предусматривает создание производств грузового, пассажирского, специализированного, легкового и индивидуального электротранспорта, а также его компонентов, организацию научного обеспечения, стандартизацию, аттестацию и оценку соответствия электротранспорта (базовых компонентов) для его безопасной эксплуатации на дорогах общего пользования, создание зарядной инфраструктуры для электротранспорта на основе общенациональной сети электрозарядных станций (далее – ЭЗС), формирование комплекса мер по стимулированию развития электротранспорта. Целью комплексной программы являются: создание новой области экономического роста на основе формирования отрасли машиностроения – производства электротранспорта, а также условий для увеличения количества используемых транспортных средств на электрической тяге, расширения инфраструктуры электротранспорта и минимизации негативных влияний на экологию. Комплексная программа включает: подпрограмму 1 «Производственно-технологическая база электротранспорта» и подпрограмму 2 «Создание зарядной инфраструктуры для электротранспорта». Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 23.04.2021 № 245 (ред. от 15.04.2022) была утверждена Государственная программа «Научные технологии и техника» на 2021–2025 гг., в которой нашли отражение также вопросы, связанные с развитием транспортных средств с электрическим приводом. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 10.12.2021 № 710 был принят Национальный план действий по развитию «зеленой» экономики в Республике Беларусь на 2021–2025 гг., предусматривающий развитие электротранспорта (инфраструктуры) и городской мобильности. Одним из приоритетных направлений внедрения и расширения

использования низкоуглеродных технологий, способствующих переходу страны к углеродной нейтральности, выбран переход от углеводородного транспорта к электрическому. Принятые в последние годы меры по стимулированию приобретения электромобилей и развитию инфраструктуры привели к росту количества таких транспортных средств. Нашли отражения вопросы электротранспорта и в Государственной программе «Транспортный комплекс» на 2021–2025 гг. (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 23.03.2021 № 165). Результаты реализации программы, несомненно, окажут позитивное влияние как на показатели работы автомобильного, городского электрического транспорта и метрополитена, так и на развитие смежных отраслей экономики (промышленности, строительства, торговли, сферы услуг) и, в конечном итоге, на макроэкономические показатели.

Некоторые российские автомобильные заводы уже производят электромобили, которые эксплуатируются на дорогах городов РФ. К таким можно отнести, прежде всего, электробусы, выпускаемые КАМАЗом и ЛиАЗом. Также в РФ намечена тенденция по принятию нормативных документов, которые способствуют развитию рынка электромобилей и зарядной инфраструктуры. Планируется внести изменения в ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» и ТР ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования» для соблюдения их требований при конструировании и эксплуатации электротранспорта. В качестве целевых показателей в РФ установлены в части создания инфраструктуры для зарядки транспортных средств с электрическим приводом с использованием быстрых и медленных зарядных станций на пилотных территориях в количестве не менее 2,9 тыс. шт. и 6 тыс. шт. соответственно (до 2024 г.), а также планируется: нарастить их количество до 29 тыс. и 44 тыс. шт. (к 2030 г.), наладить производство тяговых аккумуляторных батарей и компонентов к ним (до 2024 г.), увеличить долю производимых в РФ автомобилей с электрическим приводом на внутреннем рынке в 2030 г. не менее 10 % общего объема производства транспортных средств.

При анализе особенностей эксплуатации электробусов был выявлен ряд работ, в которых исследуются их конструктивные особенности, ездовые условия, функционирование и зарядка тяговых аккумуляторных батарей, а также зарядная инфраструктура [21–29]. Однако мало изучен вопрос расхода электроэнергии электробусов при эксплуатации в городской среде с учетом транспортных, природно-климатических и дорожных условий. Для эксплуатации важно знать влияние температуры окружающего воздуха, так как на большей части страны больше половины года преобладают низкие температуры [30, 31]. Поэтому цель исследования – выявить закономерности изменения расхода электроэнергии электробусов, работающих на городских регулярных маршрутах, от внешних условий эксплуатации. Объект исследования – процесс влияния транспортных, природно-климатических и дорожных условий на расход электроэнергии низкопольных городских электробусов большой вместимости АКСМ-Е321 и особо большой вместимости – АКСМ-Е433 в Минске, большой вместимости ЛиАЗ-6274.00 и КАМАЗ-6282, эксплуатирующихся в условиях Тюмени и Москвы.

Задачи исследования:

1) провести анализ факторов, влияющих на скорость разряда тяговых аккумуляторных батарей;

2) выявить закономерность влияния природно-климатических и транспортных условий на скорость разряда тяговых аккумуляторных батарей электробусов;

3) построить математические зависимости на основе проведенного исследования.

В результате анализа научной литературы установлены основные факторы, которые влияют на интенсивность разряда бортового источника энергии (тяговых аккумуляторных батарей или молекулярных накопителей) при эксплуатации в условиях города [9, 11, 19–21, 24, 26, 28]:

– транспортные условия и режим движения (скорость движения, количество перевозимых пассажиров, интенсивность движения и плотность транспортного потока (разгоны/торможения), количество остановочных пунктов и время нахождения на них);

– природно-климатические условия (температура окружающего воздуха, скорость и направление ветра);

– дорожные условия (наличие регулируемых и нерегулируемых перекрестков, пешеходные переходы, качество дорожного полотна, уклон дороги, наличие на дорожном полотне осадков);

– технические характеристики электробуса (продолжительность эксплуатации транспортного средства, характеристики бортовых источников энергии, тяговых аккумуляторных батарей, накопителей энергии, схема работы дополнительного оборудования и др.);

– психофизиологические особенности водителя и др.

Также на уровень заряда бортовых источников энергии влияет соотношение протяженности участков разгона и торможения. На всех современных электробусах применяется асинхронный привод, тяговый инвертор предусматривает функцию рекуперации, благодаря которой при электродинамическом торможении осуществляется заряд бортовых источников энергии, что позволяет рекуперировать до 30 % энергии, израсходованной на пусках и разгонах.

В работах [19, 20, 23, 26] указывается, что к определяющим факторам относятся: скорость движения, число остановочных пунктов, количество регулируемых и нерегулируемых перекрестков и температура окружающего воздуха. Поэтому в проводимом исследовании будут учитываться данные факторы.

### **Характеристики электробусов и параметры исследуемых маршрутов**

Технические характеристики исследуемых электробусов приведены в табл. 1 [32].

Отличительная особенность электробусов АКСМ-Е321, АКСМ-Е433 – применение системы суперконденсаторов S585V39-K7-B фирмы AOWEI в качестве бортового накопителя энергии, который является основным источником электроэнергии для всех силовых потребителей. Накопление электроэнергии осуществляется в процессе зарядки от внешней зарядной станции (600В/500А) посредством пантографа. Накопитель состоит из: непосредственно модуля суперконденсатора, системы кондиционирования (поддерживает температуру внутри модуля суперконденсатора в допустимых пределах, не допуская перегрева), электронного блока управления BMS (блок контроллера заряда/разряда суперконденсатора).

**Характеристики исследуемых марок электробусов**  
**Characteristics of the investigated brands of electric buses**

Характеристика	Электробус			
	КАМАЗ 6282	ЛиАЗ-6274	АКСМ-Е321	АКСМ-Е433
	Городской, большого класса	Городской, большого класса	Городской, большой вместимости	Городской, особо большой вместимости
Длина, мм	12400	12000	12090	18735
Номинальная пассажиро-вместимость, шт.	85	85	83	150
Количество мест для сидения, шт.	33	30	26	38
Полная масса, кг	18000	18000	18350	28000
Электродвигатель	ZF AVE 130	ZF AVE 130	АТЧД-250	ДТАН-160-4Б
Максимальная мощность двигателя, кВт	2×125	2×125	150	160
Накопитель энергии (аккумулятор)	Литий-титанатный	Литий-титанатный	Супер-конденсатор	Супер-конденсатор
Емкость накопителя энергии, кВт·ч	80	77	34	34
Запас хода, км	50	до 59	20	12,5
Тип зарядки	Портальная ультрабыстрая, медленная (ночная)	Трехфазная ультрабыстрая	Ультрабыстрая пантографная	Ультрабыстрая пантографная

### Описание эксперимента

При обработке ездовых циклов электробусов использовались данные компаний-перевозчиков ТПАТП № 1 (Тюмень) и ГУП «Мосгортранс (Москва).

В Тюмени электробус ЛиАЗ-6274 эксплуатировался на регулярном городском маршруте № 10, а в Москве КАМАЗ 6282 на маршруте № МЗК.

Маршрут № 10 протяженностью 38,5 км проходит через магистральную ул. Республики и соединяет тюменский автовокзал – тюменский железнодорожный вокзал – международный аэропорт Рощино. В прямом и обратном направлениях насчитывается по 8 остановочных пунктов. В прямом направлении по пути следования 31 светофорный объект и 12 нерегулируемых пешеходных переходов. В обратном – 30 регулируемых перекрестков и 14 нерегулируемых пешеходных переходов. Движение осуществляется по дорогам I категории с выездом на пригородную часть при движении в аэропорт. Маршрут следования состоит в основном из прямых отрезков с малым количеством уклонов и поворотов, опасные участки отсутствуют. Средний дневной пробег около 200 км.

Маршрут № МЗК протяженностью 15 км проходит по центральной части города и соединяет проспект Буденного со станцией метро «Лубянка». В прямом направлении насчитывается 22 остановочных пункта, а в обратном – 21. В прямом направлении по пути следования 25 светофорных объектов, в обратном – 21. Движение осуществляется по дорогам I категории. Маршрут следования состоит в основном из прямых отрезков с малым количеством уклонов и поворотов, опасные участки отсутствуют. Средний дневной пробег около 250 км.

Полученные данные были обработаны и сведены в табл. 2.

Объем выборки данных после устранения грубых ошибок составил: для Тюмени – 146 значений, для Москвы – 119.

Для установления уровня влияния температуры окружающего воздуха и транспортных условий минимизирована переменность ряда прочих определяющих факторов:

– на каждом из маршрутов исследовался один и тот же электробус, которым управляли два определенных водителя (работа осуществлялась в две смены);

Таблица 2

**Фрагмент ездовых данных  
на городских регулярных маршрутах  
Driving data fragment on urban regular routes**

Дата	Дневной пробег, км	Средне-суточная температура воздуха, °С	Расход электроэнергии на маршрут следования, кВт·ч	Расход на 100 км, кВт·ч
Маршрут № 10 (Тюмень)				
22.10	208	5	230	113
23.10	208	1	233	115
24.10	207	6	201	97
25.10	207	5	236	116
28.10	197	9	198	96
29.10	220	-2	238	117
30.10	209	-2	239	118
31.10	166	-4	185	119
Маршрут № МЗК (Москва)				
10.01	245	-5	509	207,8
11.01	245	-11	513	209,4
12.01	244	-13	513	210,1
13.01	244	-11	512	209,8
14.01	245	1	504	205,7
17.01	244	-2	507	207,8
18.01	245	-5	510	208,2
19.01	245	-7	512	209,0

– учтены ездовые циклы только будних дней (с понедельника по четверг);

– на протяжении всего исследования применялись одни и те же типы шин;

– не учитывались затраты энергии на дополнительное оборудование – кондиционер. Отопители салонов электробусов работают на дизельном топливе, т. е. не расходуют электроэнергию;

– на изучаемых маршрутах электробусы не имеют нулевых пробегов для подзарядки, так как электрозарядные станции находятся на конечных остановочных пунктах.

### Результаты исследования

На основе обработки ездовых экспериментов в программе Microsoft Excel построены графические зависимости, описывающие их (рис. 1, 2).

В результате обработки ездовых циклов по Москве установлено, что диапазон температур воздуха в исследуемом интервале времени, при которых эксплуатировался электробус, составлял от -13 до +27 °С. Расход электроэнергии изменялся от 196,7 кВт·ч/100 км до 211,1 кВт·ч/100 км. Минимальный расход зафиксирован при температуре окружающего воздуха +11 °С, а максимальный при -12 °С. Разница между максимальным и минимальным значением расхода электроэнергии составляет 7 %.

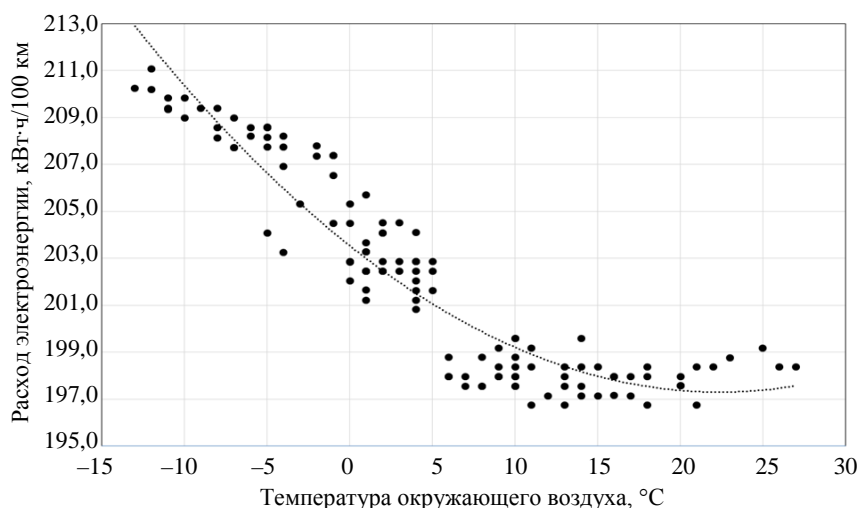


Рис. 1. Результаты эксперимента по расходу электроэнергии электробусом при эксплуатации в различных температурных условиях на маршруте № МЗК (Москва)

Fig. 1. Results of electric bus power consumption experiment under various temperature conditions on route No МЗК (Moscow)

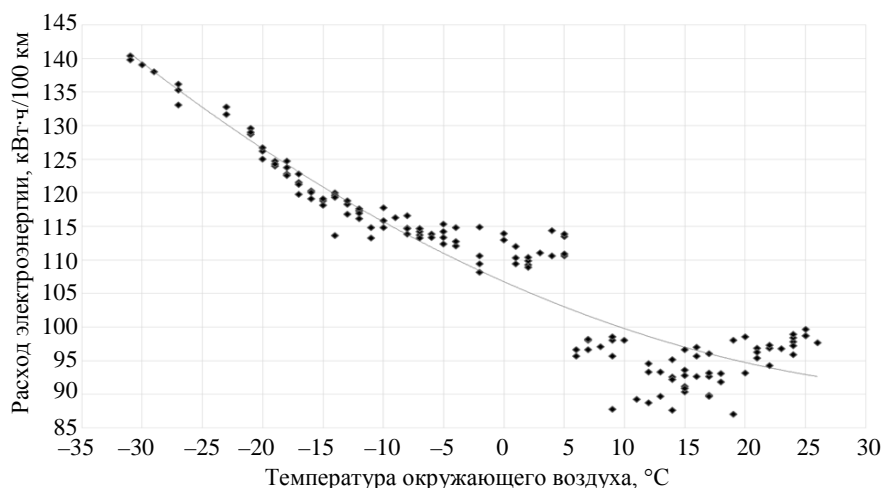


Рис. 2. Результаты эксперимента по расходу электроэнергии электробусом при эксплуатации в различных температурных условиях на маршруте № 10 (Тюмень)

Fig. 2. Results of electric bus power consumption experiment under various temperature conditions on route No 10 (Tyumen)

В результате обработки ездовых циклов по Тюмени установлено, что диапазон температур воздуха в исследуемом интервале времени, при которых эксплуатировался электробус, составлял от  $-31$  до  $+26$  °С. Расход электроэнергии изменялся от  $87,6$  кВт·ч/100 км до  $140,4$  кВт·ч/100 км. Минимальный расход зафиксирован при температуре окружающего воздуха  $+14$  °С, а максимальный при  $-31$  °С. Разница между максимальным и минимальным значением расхода электроэнергии составляет 38 %.

На представленных графиках рис. 1 и 2 видно, что при температурах окружающего воздуха от  $+5$  °С и ниже наблюдается некоторое увеличение электроэнергии, которое более выражено для электробуса, эксплуатируемого в Тюмени. Можно предположить, что расход электроэнергии при температурах ниже  $+5$  °С увеличивается, прежде всего, за счет системы подогрева аккумуляторных батарей (на российских электробусах установлена система термостатирования для обогрева тяговых аккумуляторных батарей). И чем ниже значения температур, тем более продолжительное время

работает данная система и расходует дополнительную энергию. Таким образом, можно сказать, что температура окружающего воздуха влияет на расход электроэнергии не напрямую, а косвенно, вследствие функционирования системы термостатирования.

На основе построенных графических зависимостей (рис. 1 и 2) в программе Microsoft Excel рассчитаны регрессионные квадратичные математические модели, описывающие закономерность изменения расхода электроэнергии электробусами:

для маршрута в Москве

$$q_{\text{эл КАМАЗ}} = 0,0121t_{\text{в}}^2 - 0,5527t_{\text{в}} + 203,6; \quad (1)$$

для маршрута в Тюмени

$$q_{\text{эл ЛиАЗ}} = 0,0097t_{\text{в}}^2 - 0,7958t_{\text{в}} + 106,77, \quad (2)$$

где  $t_{\text{в}}$  – фактическая среднесуточная температура окружающего воздуха, °С.

Некоторые статистические характеристики математических моделей (1), (2) получены с использованием программы Statistica 8.0 и представлены в табл. 3.

Таблица 3

Статистические характеристики математических моделей  
Statistical characteristics of mathematical models

Номер маршрута	Коэффициент детерминации, $R^2$	Средняя ошибка аппроксимации, %	Критерий Фишера F (0,95)	t-критерий
$q_{\text{эл КАМАЗ}}, \text{ № МЗК}$	0,89	2,2	360	206
$q_{\text{эл ЛиАЗ}}, \text{ № 10}$	0,85	4,7	1009	64

Проводя анализ значений статистических характеристик, представленных в табл. 3, можно заключить, что коэффициенты детерминации 0,89 и 0,85 свидетельствуют о том, что на долю вариации температуры окружающего воздуха приходится большая часть по сравнению с остальными факторами в модели, влияющими на изменение расхода электроэнергии. Таким образом, полученные математические модели имеют высокое практическое значение. Статистическая значимость коэффициентов подтверждена значениями критерия Стьюдента ( $t$ -критерия). Исходя из того, что средняя ошибка аппроксимации не превышает 5 %, полученные модели можно использовать в качестве регрессии. Значения критерия Фишера  $F$  при уровне доверительной вероятности 0,95 больше табличного, следовательно, регрессионные модели адекватно описывают влияние температуры окружающего воздуха на расход энергии.

В 2020 г. в Минске исследовалась работа электробусов АКСМ-Е321, АКСМ-Е433 при эксплуатации на городских маршрутах. Данные о работе электробусов обработаны и сгруппированы (определен удельный расход электроэнергии по каждой модели, приведена среднемесячная температура воздуха). Результаты исследования представлены на рис. 3. По схожей методике с применением средств статистического анализа получены зависимости удельного расхода электроэнергии от среднемесяч-

ной температуры воздуха, результаты представлены на рис. 4. Следует учесть, что данные модели электробусов имеют дизельное отопление и не оборудованы системами климат-контроля. Таким образом, влияние сопутствующих факторов на полученные удельные значения расхода электроэнергии минимально и мы имеем дело с удельным расходом электроэнергии на тягу транспортных средств с электрическим приводом (с учетом рекуперации энергии).

Поскольку электробусы АКСМ-Е321, АКСМ-Е433 реализованы по концепции ОС ультрабыстрой зарядки в процессе эксплуатации при низких температурах, выявлены некоторые дополнительные факторы, влияющие на режимы их эксплуатации. К ним относится неплотное прилегание в точке контакта угольной вставки пантографа к контактным шинам зарядной станции модели СЗА-01(600V/500A), в результате чего происходит выгорание угольной вставки пантографа, а в зимнее время это приводит к ее сколам. Угольная вставка пантографа требует дополнительного внимания, очистки от нагара, такие же действия необходимы и контактным шинам зарядной станции. Повышение контактного сопротивления и падение напряжения в зимнее время вызывают увеличение времени зарядки, снижение ее качества; оборудование зарядных станций подвержено замерзанию, необходимы дополнительное время и средства для его обслуживания.

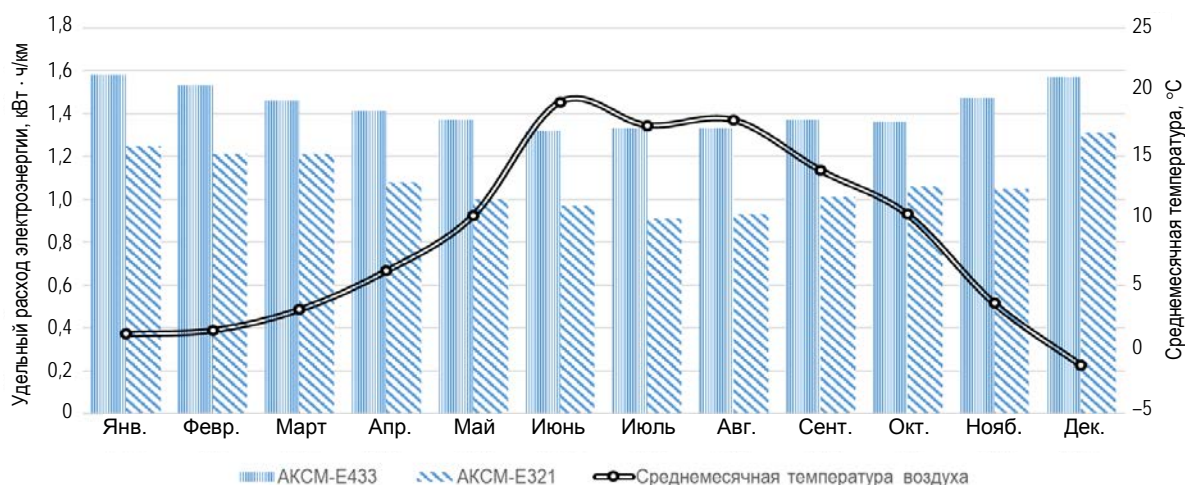


Рис. 3. Результаты исследования удельного расхода электроэнергии электробусов с суперконденсаторными накопителями энергии в Минске

Fig. 3. Results of the study of specific electricity consumption of electric buses with supercapacitor energy storage devices in Minsk



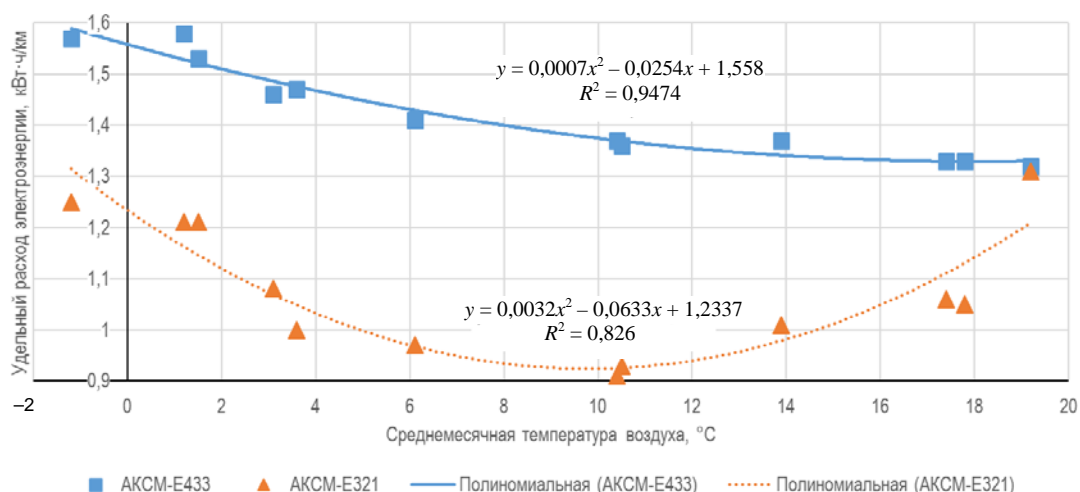


Рис. 4. Результаты статистической обработки зависимости удельного расхода электроэнергии от среднемесячной температуры воздуха электробусов с суперконденсаторными накопителями энергии в Минске

Fig. 4. Results of statistical processing of dependence of the specific power consumption from average monthly air temperature of electric buses with supercapacitor energy storage in Minsk

Перегрев силовой электроники зарядной станции при непрерывном использовании приводит к срабатыванию защиты по перегреву, в результате чего происходит ограничение зарядного тока и увеличение времени зарядки, в условиях снегопадов размещение и позиционирование электробуса к шинам зарядной станции затруднено.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при схожих технических характеристиках электробусов (с учетом введенных ограничений эксперимента и в одинаковых диапазонах температур) наблюдается значительно больший расход электроэнергии на маршруте в Москве по сравнению с Тюменью. Например, при температуре +10 °C электробус расходует энергии больше на 51 %, а при -10 °C на 44 %. Это можно объяснить тем, что маршрут в Москве проходит в центральной части с более плотным транспортным потоком, чем в Тюмени. На тюменском маршруте есть участок (при следовании в аэропорт и из него) протяженностью 8 км без регулируемых перекрестков и светофоров. Таким образом, 42 % этого маршрута проходит с установленной скоростью. Еще одним фактором является количество остановочных пунктов, разгонов и торможений. Исходя из характери-

стик маршрутов установлено, что в Москве в среднем на каждые 350 м приходится одна остановка. В Тюмени этот показатель на 85 % выше – в среднем расстояние между остановками составляет 2400 м.

2. Как показал эксперимент, для московского маршрута № МЗК значительная доля расхода электроэнергии, при прочих схожих условиях, приходится на скорость движения в транспортном потоке, а также количество разгонов и торможений при посадке и высадке пассажиров. Для тюменского маршрута № 10 более весомой является температура окружающего воздуха. В отрицательном диапазоне температур увеличение расхода энергии осуществляется за счет функционирования системы термостатирования, предназначенной для обогрева тяговых батарей.

3. Тенденция увеличения удельного расхода электроэнергии по мере снижения температуры окружающего воздуха прослеживается также и для электробусов АКСМ-E321, АКСМ-E433.

Статья подготовлена в рамках реализации Государственного задания в сфере науки на выполнение коллективами научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России, по проекту «Новые закономерности и решения для функционирования городских транспортных систем в парадигме «Переход от владения личным автомобилем к мобильности как услуге»» (№ 0825-2020-0014, 2020–2022 гг.).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Azemsha, S. A Method for Assessing the Automobiliation Impact on Population Morbidity / S. Azemsha, D. Kapski, P. Pegin // *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. P. 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.037>.
2. Influence of Ambient Temperature on the CO<sub>2</sub> Emitted with Exhaust Gases of Gasoline Vehicles / D. Chainikov [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 142. P. 012109. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012109>.
3. Chikishev, E. Assessment of External Factors Influence on the Fuel Consumption of a Diesel Bus Operating on a City Route / E. Chikishev, D. Chainikov // *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 61. P. 354–360. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.057>.
4. Giraldo, M. Real Emissions, Driving Patterns and Fuel Consumption of In-use Diesel Buses Operating at High Altitude / M. Giraldo, J. I. Huertas // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2019. Vol. 77. P. 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.004>.
5. Comparison of Real Driving Emissions from Euro VI Buses with Diesel and Compressed Natural Gas Fuels / A. Gómez [et al.] // *Fuel*. 2019. Vol. 2891. P. 119836. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119836>.
6. Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal / I. Frade [et al.]. *Transportation Research Record*. 2011. Vol. 2252. P. 91–98. <https://doi.org/10.3141/2252-12>.
7. Ivanov, A. Level Recession of Emissions Release by Motor-and-Tractor Diesel Engines Through the Application of Water-fuel Emulsions / A. Ivanov, E. Chikishev // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 50. P. 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/50/1/012005>.
8. Анализ развития различных видов городского электрического транспорта в Полоцке и Новополоцке / Д. В. Капский [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21. № 2. С. 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157>.
9. Hnatov, A. Energy Saving Technologies for Urban Bus Transport / A. Hnatov, S. Arhun, S. Ponikarovska // *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 14, No 4. P. 4649–4664. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.
10. Kuharonak, G. M. Ensuring Requirements for Emissions of Harmful Substances of Diesel Engines / G. M. Kuharonak, D. V. Kapskiy, V. I. Berezun // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 305–310. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-305-310>.
11. Comparative Analysis of Cost, Emissions and Fuel Consumption of Diesel, Natural Gas, Electric and Hydrogen Urban Buses / P. Muñoz [et al.] // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 2571. P. 115412. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412>.
12. Real-World Fuel Consumption, Fuel Cost and Exhaust Emissions of Different Bus Powertrain Technologies / S. R. Oprešnik [et al.] // *Energies*. 2018. Vol. 11, No 8. P. 2160. <https://doi.org/10.3390/en11082160>.
13. Özener, O. Fuel Consumption and Emission Evaluation of a Rapid Bus Transport System at Different Operating Conditions / O. Özener, M. Özkan // *Fuel*. 2020. Vol. 265. P. 117016. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117016>.
14. Effects of Passenger Load, Road Grade, and Congestion Level on Real-World Fuel Consumption and Emissions from Compressed Natural Gas and Diesel Urban Buses / F. Rosero [et al.] // *Applied Energy*. 2021. Vol. 282. P. 116195. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116195>.
15. Estimation of Bus Emission Models for Different Fuel Types of Buses under Real Conditions / C. Wang [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 640–641. P. 965–972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.289>.
16. Low-Carbon Oriented Optimal Energy Dispatch in Coupled Natural Gas and Electricity Systems / Y. Wang [et al.] // *Applied Energy*. 2020. Vol. 280. P. 115948. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115948>.
17. Real-Road Driving and Fuel Consumption Characteristics of Public Buses in Southern China / H. Yu [et al.] // *International Journal of Automotive Technology*. 2020. Vol. 21, No 1. P. 33–40. <https://doi.org/10.1007/s12239-020-0004-0>.
18. Electric Vehicles [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>. Date of access: 25.06.2022.
19. Chikishev, E. Impact of Natural and Climatic Conditions on Electric Energy Consumption by an Electric City Bus / E. Chikishev // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 57. P. 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.032>.
20. Gorbunova, A. Studying the Formation of the Charging Session Number at Public Charging Stations for Electric Vehicles / A. Gorbunova, I. Anisimov, E. Magaril // *Sustainability (Switzerland)*. 2020. Vol. 12, No 14. P. 5571. <https://doi.org/10.3390/su12145571>.
21. Bezruchonak, A. Geographic Features of Zero-Emissions Urban Mobility: the Case of Electric Buses in Europe and Belarus / A. Bezruchonak // *European Spatial Research and Policy*. 2019. Vol. 26, No 1. P. 81–99. <https://doi.org/10.18778/1231-1952.26.1.05>.
22. Brdulak, A. Development Forecasts for the Zero-Emission Bus Fleet in Servicing Public Transport in Chosen EU Member Countries / A. Brdulak, G. Chaberek, J. Jagodzinski // *Energies*. 2020. Vol. 13, No 6. P. 4239. <https://doi.org/10.3390/en13164239>.
23. Modeling and Experimental Investigation of Thermal Comfort and Energy Consumption in a Battery Electric Bus / F. Cigarini [et al.] // *World Electric Vehicle Journal*. 2021. Vol. 12, No 1. Art. No 7. <https://doi.org/10.3390/wevj12010007>.
24. Fadyushin, A. Influence of the Parameters of the Bus Lane and the Bus Stop on the Delays of Private and Public Transport / A. Fadyushin, D. Zakharov // *Sustainability (Switzerland)*. 2020. Vol. 12, No 22. Art. No 9593. <https://doi.org/10.3390/su12229593>.
25. He S. Y., 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 / S. Y. He, Y.-H. Kuo, D. Wu. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016. Vol. 67. P. 131–148. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.003>.
26. Active Cell Balancing for Life Cycle Extension of Lithium-Ion Batteries under Thermal Gradient / P. Kremer [et al.] // *Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design*, 2021–July. 2021. P. 9502500. <https://doi.org/10.1109/ISLPED52811.2021.9502500>.
  27. Todoruț, A. Replacing Diesel Buses with Electric Buses for Sustainable Public Transportation and Reduction of CO<sub>2</sub> Emissions / A. Todoruț, N. Cordoș, C. Iclodean // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2020. Vol. 29, No 5. P. 3339–3351. <https://doi.org/10.15244/pjoes/112899>.
  28. Sathaye, N. An Approach for the Optimal Planning of Electric Vehicle Infrastructure for Highway Corridors / N. Sathaye, S. Kelley // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2013. Vol. 59. P. 15–33. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.08.003>.
  29. Optimizing the Spatio-Temporal Deployment of Battery Electric Bus System / R. Wei [et al.] // *Journal of Transport Geography*. 2018. Vol. 68. P. 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013>.
  30. Assessment of Adaptability of Natural Gas Vehicles by the Constructive Analogy Method / I. Anisimov [et al.] // *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 2017. Vol. 12, No 6. P. 1006–1017. <https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N6-1006-1017>.
  31. Petrov, A. Electric Bus in Tyumen: The Chase for Trends and Problems of Exploitation / A. Petrov, D. Petrova // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 110. P. 01014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001014>.
  32. Бодня, О. Все электробусы, которые есть в России: от серийных до опытных [Электронный ресурс] / О. Бодня // 5 колесо. 2022. Режим доступа: <https://5koleso.ru/avtopark/avtobusy/opyty-s-elektrichestvom>. Дата доступа: 15.06.2022.
- Поступила 09.08.2022  
Подписана в печать 15.11.2022  
Опубликована онлайн 31.01.2023

## REFERENCES

1. Azemsha S., Kapski D., Pegin P. (2018) A Method for Assessing the Automobiliation Impact on Population Morbidity. *Transportation Research Procedia*, 36, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.037>.
2. Chainikov D., Chikishev E., Anisimov I., Gavaev A. (2016) Influence of Ambient Temperature on the CO<sub>2</sub> Emitted with Exhaust Gases of Gasoline Vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 142, 012109. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012109>.
3. Chikishev E., Chainikov D. (2020) Assessment of External Factors Influence on the Fuel Consumption of a Diesel Bus Operating on a City Route. *Transportation Research Procedia*, 61, 354–360. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.057>.
4. Giraldo M., Huertas J. I. (2019) Real Emissions, Driving Patterns and Fuel Consumption of In-use Diesel Buses Operating at High Altitude. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.004>.
5. Gómez A., Fernández-Yáñez P., Soriano J. A., Sánchez-Rodríguez L., Mata C., García-Contreras R., Armas O., Cárdenas M. D. (2021) Comparison of Real Driving Emissions from Euro VI Buses with Diesel and Compressed Natural Gas Fuels. *Fuel*, 2891, 119836. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119836>.
6. Frade I., Ribeiro A., Gonçalves G., Antunes A. (2011) Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal. *Transportation Research Record*, 2252, 91–98. <https://doi.org/10.3141/2252-12>.
7. Ivanov A., Chikishev E. (2017) Level Recession of Emissions Release by Motor-and-Tractor Diesel Engines Through the Application of Water-fuel Emulsions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 50, 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/50/1/012005>.
8. Kapskiy D. V., Kuzmenko V. N., Krasilnikava A. S., Semchenkov S. S., Kot E. N., Larin O. N. (2022) Analysis of Development of Various Types of Urban Electric Transport in Polotsk and Novopolotsk. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 21 (2), 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157> (in Russian).
9. Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S. (2017) Energy Saving Technologies for Urban Bus Transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14 (4), 4649–4664. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.
10. Kuharonak G. M., Kapski D. V., Berezun V. I. (2020) Ensuring Requirements for Emissions of Harmful Substances of Diesel Engines. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 19 (4), 305–310. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-305-310>.
11. Muñoz P., Franceschini E. A., Levitan D., Rodriguez C. R., Humana T., Perelmuter G. C. (2022) Comparative Analysis of Cost, Emissions and Fuel Consumption of Diesel, Natural Gas, Electric and Hydrogen Urban Buses. *Energy Conversion and Management*, 2571, 115412. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412>.
12. Oprešnik S. R., Seljak T., Vihar R., Gerbec M., Katrašnik T. (2018) Real-World Fuel Consumption, Fuel Cost and Exhaust Emissions of Different Bus Powertrain Technologies. *Energies*, 11 (8), 2160. <https://doi.org/10.3390/en11082160>.
13. Özener O., Özkan M. (2020) Fuel Consumption and Emission Evaluation of a Rapid Bus Transport System at Different Operating Conditions. *Fuel*, 265, 117016. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117016>.
14. Rosero F., Fonseca N., López J.-M., Casanova J. (2021) Effects of Passenger Load, Road Grade, and Congestion Level on Real-World Fuel Consumption and Emissions

- from Compressed Natural Gas and Diesel Urban Buses. *Applied Energy*, 282, 116195. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116195>.
15. Wang C., Ye Z., Yu Y., Gong W. (2018) Estimation of Bus Emission Models for Different Fuel Types of Buses under Real Conditions. *Science of the Total Environment*, 640–641, 965–972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.289>.
  16. Wang Y., Qiu J., Tao Y., Zhang X., Wang G. (2020) Low-carbon Oriented Optimal Energy Dispatch in Coupled Natural Gas and Electricity Systems. *Applied Energy*, 280, 115948. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115948>.
  17. Yu H., Liu Y., Li J., Liu H., Ma K. (2020) Real-Road Driving and Fuel Consumption Characteristics of Public Buses in Southern China. *International Journal of Automotive Technology*, 21 (1), 33–40. <https://doi.org/10.1007/s12239-020-0004-0>.
  18. Electric Vehicles. Available at: <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles> (accessed 25 June 2022).
  19. Chikishev E. (2021) Impact of Natural and Climatic Conditions on Electric Energy Consumption by an Electric City Bus. *Transportation Research Procedia*, 57, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.032>.
  20. Gorbunova A., Anisimov I., Magaril E. (2020) Studying the Formation of the Charging Session Number at Public Charging Stations for Electric Vehicles. *Sustainability (Switzerland)*, 12 (14), 5571. <https://doi.org/10.3390/su12145571>.
  21. Bezruchonak A. (2019) Geographic Features of Zero-Emissions Urban Mobility: the Case of Electric Buses in Europe and Belarus. *European Spatial Research and Policy*, 26 (1), 81–99. <https://doi.org/10.18778/1231-1952.26.1.05>.
  22. Brdulak A., Chaberek G., Jagodzinski J. (2020) Development Forecasts for the Zero-Emission Bus Fleet in Serving Public Transport in Chosen EU Member Countries. *Energies*, 13 (6), 4239. <https://doi.org/10.3390/en13164239>.
  23. Cigarini F., Fay T.-A., Artemenko N., Göhlich D. (2021) Modeling and Experimental Investigation of Thermal Comfort and Energy Consumption in a Battery Electric Bus. *World Electric Vehicle Journal*, 12 (1), 1–22, 7. <https://doi.org/10.3390/wevj12010007>.
  24. Fadyushin A., Zakharov D. (2020) Influence of the Parameters of the Bus Lane and the Bus Stop on the Delays of Private and Public Transport. *Sustainability (Switzerland)*, 12 (22), 1–18, 9593. <https://doi.org/10.3390/su12229593>.
  25. He S. Y., 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*, 67, 131–148. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.003>.
  26. Kremer P., Cigarini F., Gohlich D., Park S. (2021) Active Cell Balancing for Life Cycle Extension of Lithium-Ion Batteries under Thermal Gradient. *Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design*, 2021–July, 9502500. <https://doi.org/10.1109/ISLPED52811.2021.9502500>.
  27. Todoruț A., Cordoș N., Iclodean C. (2020) Replacing Diesel Buses with Electric Buses for Sustainable Public Transportation and Reduction of CO<sub>2</sub> Emissions. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29 (5), 3339–3351. <https://doi.org/10.15244/pjoes/112899>.
  28. Sathaye N., Kelley S. (2013) An Approach for the Optimal Planning of Electric Vehicle Infrastructure for Highway Corridors. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 59, 15–33. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.08.003>.
  29. Wei R., Liu X., Ou Y., Fayyaz S. K. (2018) Optimizing the Spatio-Temporal Deployment of Battery Electric Bus System. *Journal of Transport Geography*, 68, 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013>.
  30. Anisimov I., Ivanov A., Chikishev E., Chainikov D., Reznik L., Gavaev A. (2017) Assessment of Adaptability of Natural Gas Vehicles by the Constructive Analogy Method. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12 (6), 1006–1017. <https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N6-1006-1017>.
  31. Petrov A., Petrova D. (2019) Electric Bus in Tyumen: The Chase for Trends and Problems of Exploitation. *E3S Web of Conferences*, 110, 01014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001014>.
  32. Bodnya O. (2022) All Electric Buses That Are in Russia: from Serial to Experimental. *5 Koleso [5 Wheel]*. Available at: <https://5koleso.ru/avtopark/avtobusy/opyty-s-elektrichestvom> (accessed 15 June 2022) (in Russian).

Received: 09.08.2022

Accepted: 15.11.2022

Published online: 31.01.2023