

# ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ В ГОРОДАХ



А.Э. Горев



О.В. Попова

Статья посвящена сбалансированному развитию транспортных систем городов, в том числе повышению экологичности городского пассажирского транспорта. Приводятся результаты исследования эффективности замены автобусов на электробусы с динамической зарядкой на примере ряда маршрутов Санкт-Петербурга. Подобная замена дает устойчивый эффект в виде снижения эксплуатационных затрат, который можно повысить за счет увеличения срока службы аккумуляторной батареи.

*Ключевые слова:* электробус с динамической зарядкой, троллейбус с автономным ходом, сбалансированное развитие

EDN: ALWGEU

Процессы развития городов в РФ ведут к увеличению доли городского населения и «городского» образа жизни и характеризуются концентрацией населения в крупнейших и крупных городах. Такое преобразование крупнейших городов в мегаполисы, где рост населения и числа автомобилей опережает развитие различных инфраструктурных и сервисных сфер, вызывает большое количество проблем, связанных с поддержанием комфортной среды для проживания, обеспечения современного уровня мобильности, экологии и т.п.

Увеличение численности населения в городах ведет к появлению серьезных проблем с обеспечением мобильности населения в связи с:

- повышением плотности населения, которая требует повышения пропускной способности улично-дорожной сети;

- увеличением расстояния перемещения населения, что повышает долю транспортного времени в суточном балансе.

Наиболее эффективным подходом к решению этих задач служит стремление к сбалансированному развитию городских территорий [1–4].

Устойчивое (сбалансированное) развитие (sustainable development) – это баланс перспективного развития территории, направленный в первую очередь на повышение качества жизни населения с учетом текущих и перспективных экономических

**Горев Андрей Эдливич**, доктор экономических наук, профессор, руководитель проектов отдела пассажирского транспорта Центра пассажирского транспорта Академии транспортного планирования Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)), Заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов: повышение эффективности транспортных систем, цифровизация управления городским пассажирским транспортом. Автор более 150 научных работ, в том числе пяти учебников.

**Попова Ольга Валентиновна**, кандидат технических наук, доцент, руководитель проектов отдела пассажирского транспорта Центра пассажирского транспорта Академии транспортного планирования Российской университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: повышение эффективности работы транспорта общего пользования, цифровизация и инновации в транспортной отрасли. Автор более 40 научных работ, в том числе двух учебников и одного учебного пособия.

возможностей при улучшении экологической ситуации. Понятие устойчивого развития подразумевает взаимодействие и взаимодополнение экономических, социальных и экологических аспектов прогресса, как это показано на схеме (рис. 1).

Экономическая составляющая предопределяет оптимальное использование ограниченных ресурсов, использование сберегающих технологий и справедливое распределение совокупного дохода.

Социальная составляющая фокусируется на благо-получии человека и стремится поддерживать устойчивость общественных и культурных систем.

Экологическая составляющая направлена на поддержание целостности биологических и физических экосистем.

Залогом устойчивого развития городов является развитие сбалансированной транспортной системы, которая должна обеспечивать:

- современный уровень мобильности населения при высоком уровне территориальной и экономической доступности мультимодальных поездок;
- высокие экологические стандарты с перспективой «нулевых» выбросов от подвижного состава (полную электрификацию городского транспорта).

### Повышение экологичности городского транспорта

Подвижной состав (ПС) городского пассажирского транспорта (ГПТ) с различным типом привода может проехать разное расстояние при одинаковом количестве потребляемой энергии<sup>1</sup> (рис. 2). Эти данные свидетельствуют о том, что электробусы на

аккумуляторных батареях экономят топливо почти в четыре раза больше, чем автобусы на компримированном природном газе, а самым экономичным является троллейбус за счет получения энергии из внешнего источника.

Представленные на рис. 2 данные показывают, что увеличение экологической и экономической эффективности ГПТ будет зависеть от перехода на электрический привод. Опыт показывает, что замена автобусов с дизельным двигателем на электробусы связана с увеличением затрат на сам ПС и зарядные станции. В то же время прогресс в технологиях и снижение стоимости тяговых аккумуляторных батарей позволил производителям троллейбусов обеспечивать им возможность движения с полной нагрузкой на участках маршрута без контактной сети – автономный ход.

Троллейбус с увеличенным автономным ходом – электробус с динамической подзарядкой типа ИМС (In-motion charging) за счет наличия тяговых аккумуляторных батарей обладает следующими преимуществами:

- может двигаться с пассажирами по участкам маршрута без контактной сети, что позволяет продлевать действующий маршрут, гибко вносить в него изменения при изменении спроса, авариях или дорожных работах;
- продолжает работать на маршруте при повреждениях отдельных участков контактной сети за счет автоматики опускания и подъема токоприемных штанг;
- оптимально использует аккумуляторные батареи, поскольку они заряжаются в процессе движения по маршруту (не допускается их глубокая разрядка),

<sup>1</sup> По данным Американской лаборатории по возобновляемым источникам энергии (National Renewable Energy Laboratory (NREL)).



Рис. 1. Концепция сбалансированного развития

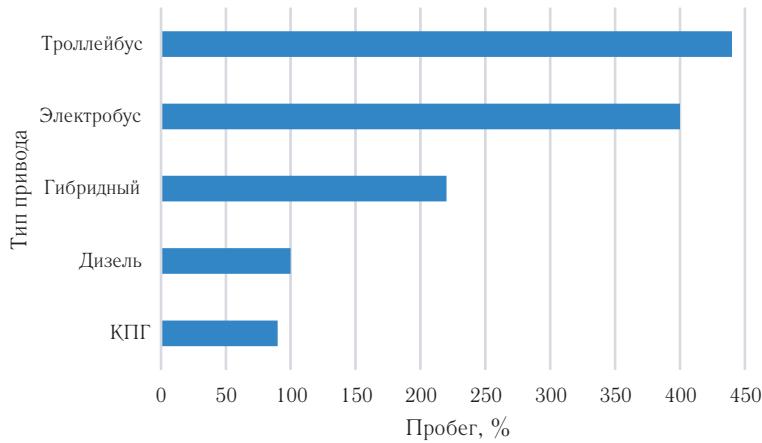


Рис. 2. Относительный пробег, совершаемый различными видами ПС ГПТ, при потреблении одинакового количества энергии

отсутствуют сверхнормативные простоя на конечных станциях, что характерно для электробусов с быстрой зарядкой при существенной разрядке аккумуляторов;

- не требуется строительство дополнительной контактной сети на конечных станциях, разворотных площадках, в депо и парках, за счет возможности маневрировать с опущенными токоприемными штангами.

Протяженность участков без контактной сети должна составлять 30–40 % от протяженности участков с контактной сетью для возможности зарядки аккумуляторов, при этом контактная сеть должна выдерживать более значительные нагрузки, т.е. провода должны иметь большее сечение при достаточной мощности тяговых подстанций.

### Эффективность использования электробусов с динамической зарядкой

Эффективность использования электробусов с динамической зарядкой позволяет ГПТ эволюционировать в направлении повышения сбалансированного развития, в том числе с улучшением экологичности по сравнению с автотранспортом [5;6]. В соответствии с этой тенденцией использование троллейбусов с большим (увеличенным) автономным ходом (ТУАХ) является возможной альтернативой замены автобусов, а также логическим развитием современных троллейбусных систем в направлении повышения гибкости работы и экологичности ГПТ [7;8]. В рамках данного исследования авторы остановились на оценке эффективности использования ТУАХ взамен использования автобусов в центральной части Санкт-Петербурга. Подобная замена позволит создать так называемую экозону, в которой преимущественно должен исполь-

зоваться электротранспорт. Создание экозоны будет стимулировать перевозчиков к приобретению экологически чистого подвижного состава и способствовать снижению загрязнения атмосферы, что позволит повысить качество жизни людей, проживающих и работающих в центре города, а также повысить его имидж как европейского города [9–13].

В рассматриваемой экозоне проходит более 50 автобусных маршрутов. Каждый маршрут анализировался на предмет возможности или невозможности использования на нем ТУАХ. На маршрутах, где протяженность участков с контактной сетью менее 45 % протяженности маршрута и протяженность участка без контактной сети более 10 км возможность использования электробусов с динамической зарядкой не рассматривалась.

При анализе автобусных маршрутов для рассмотрения возможности использования ТУАХ также учитывались особенности прохождения маршрута, расположение остановочных пунктов, количество и протяженность участков без контактной сети и величина парковых пробегов. В результате анализа для оценки эффективности замены автобусов с двигателем внутреннего сгорания на электробусы с динамической зарядкой, были выбраны четыре автобусных маршрута: 6, 47, 105 и 128.

Оценка эффективности использования электробусов с динамической зарядкой рассматривалась на основе сопоставления варианта замены автобусов на ТУАХ с вариантом отказа от реализации предлагаемого мероприятия.

Для этого в рамках проведенного исследования был произведен расчет затрат на эксплуатацию ПС по рассматриваемым маршрутам для двух сценариев:

*1 сценарий.* Замена автобусов на ТУАХ на четырех автобусных маршрутах (6, 47, 105 и 128). На маршрутах 6, 105 и 128 на момент проведения исследования работает ПС большого класса вместимости, который будет заменен на ТУАХ большого класса вместимости. На маршруте 47 работают автобусы среднего класса вместимости. С целью сохранения существующих интервалов движения представляется целесообразным произвести замену автобусов, работающих на маршруте 47, на ТУАХ большого класса вместимости в том же количестве.

*2 сценарий.* Существующий вариант, т.е. отказ от использования ТУАХ на автобусных маршрутах 6, 47, 105 и 128.

Затраты на эксплуатацию подвижного состава включают все расходы перевозчика на обслуживание маршрутов и поддержание ПС в исправном состоянии [14;15]. В основе проведенных расчетов по рассматриваемым сценариям учитывались требования Приказа Минтранса №351 [16].

При определении затрат на электроэнергию на движение ТУАХ учитывался коэффициент энергоэффективности  $K_s$ . Коэффициент  $K_s$  учитывает уменьшение потребления электроэнергии на маршруте, на котором работает ТУАХ, по сравнению с аналогичным маршрутом, на котором работает троллейбус, использующий контактную сеть на всем протяжении маршрута. Полагая, что потребление электроэнергии на маршруте за время движения ТУАХ в обоих направлениях при питании от контактной сети оценивается в 100% (коэффициент 1). Тогда, при движении ТУАХ на участке автономного хода, потребления электроэнергии нет (коэффициент 0), а на участке движения от контактной сети, равном протяженности автономного хода, происходит подзарядка аккумулятора (коэффициент 1,6, так как штатное движение на участке происходит с коэффициентом 1, а подзарядка происходит из двух источников – 60% от контактной сети и 40% от рекуперации энергии торможения). На оставшемся участке потребление в штатном режиме

(коэффициент 1). Таким образом, коэффициент энергоэффективности может быть рассчитан по следующей формуле:

$$K_s = (1,6L_{\text{бппрям}} + 1,6L_{\text{бпобр}} + (2L_m - 2L_{\text{бппрям}} - 2L_{\text{бпобр}})) / 2L_m,$$

где  $L_{\text{бппрям}}$  – протяженность маршрута без проводов в прямом направлении, км;  $L_{\text{бпобр}}$  – протяженность маршрута без проводов в обратном направлении, км;  $2L_m$  – протяженность маршрута в обоих направлениях, км.

При определении амортизационных отчислений при использовании ТУАХ учитывалось, что срок полезного использования троллейбуса и аккумуляторного модуля имеет различное значение, что в расчетах учитывалось следующим образом:

$$A_{\text{акб}} = (C_r + C_a \cdot (T_r / T_a)) / T_r,$$

где  $A_{\text{акб}}$  – сумма начисленной амортизации при использовании ТУАХ, руб.;  $C_r$  – стоимость троллейбуса, руб.;  $C_a$  – стоимость аккумуляторного модуля, руб.;  $T_r$  – срок полезного использования троллейбуса, лет;  $T_a$  – срок полезного использования аккумуляторного модуля, лет.

В табл. 1 приведены исходные данные для расчета эксплуатационных расходов перевозчика по рассматриваемым вариантам, а на рис. 3 результаты расчета для сравнения рассматриваемых сценариев (1 сценарий – использование на рассматриваемых маршрутах ТУАХ; 2 сценарий – автобусные маршруты без замены автобусов на ТУАХ).

В табл. 2 приведены сравнительные данные годовых эксплуатационных расходов и удельных эксплуатационных расходов для двух рассматриваемых сценариев. При расчете годовых эксплуатационных расходов и себестоимости для каждого из сценариев учитывались одинаковые значения рентабельности и коэффициента использования пробега.

Сравнивая результаты расчетов эксплуатационных расходов по двум рассматриваемым сценариям из рис. 3 и табл. 2 видно, что преимущество имеет

Таблица 1

Исходные данные для расчета эксплуатационных расходов перевозчика

Показатель	Сценарий 1		Сценарий 2	
	ТУАХ	Автобусы		
Класс ПС (средний – СК; большой – БК)	БК	СК	БК (ДТ*)	БК (СПГ**)
Количество ПС, ед.	62	6	44	12
Пробег, км	2985900,36	374621,28	1819103,52	792175,56

\* – Автобусы, работающие на дизельном топливе. \*\* – Автобусы, работающие на сжиженном природном газе.

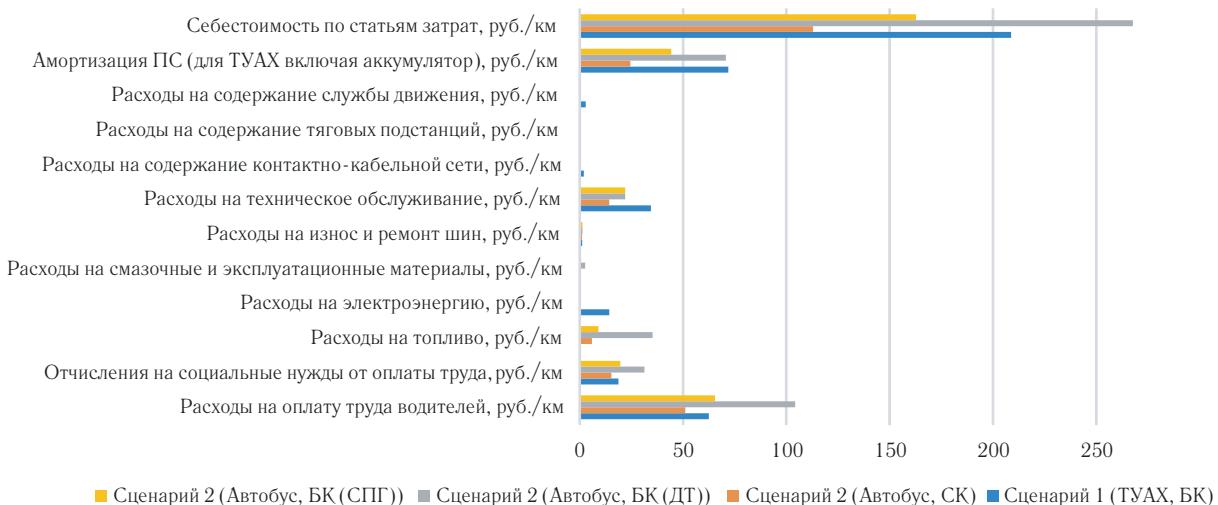


Рис. 3. Эксплуатационные расходы по статьям затрат для двух сценариев

Таблица 2

Сравнительная характеристика двух рассматриваемых сценариев

Показатель	Сценарий 1 (ТУАХ)	Сценарий 2 (Автобусы)
Годовые эксплуатационные расходы на весь ПС, млн руб.	759,22	801,67
Приведенные эксплуатационные расходы, руб./км	254,27	268,49
Приведенные эксплуатационные расходы, руб./место-км	2,83	3,16

ТУАХ. Так, при замене на четырех рассматриваемых маршрутах автобусов на ТУАХ, годовые эксплуатационные расходы снижаются на 5,3%, а себестоимость 1 место-км на 10,4%.

Из рис. 3 видно, что наибольшие затраты приходятся на дизельные автобусы большого класса вместимости, поэтому замена подобных автобусов на ТУАХ принесет еще большую выгоду. Так, если бы на четырех рассматриваемых маршрутах работали дизельные автобусы большого класса вместимости, то при замене их на ТУАХ большого класса вместимости, годовые эксплуатационные расходы составят 867,16 млн руб., что на 12,4% выше, чем при использовании электробусов с динамической зарядкой при равных условиях эксплуатации (одинаковом количестве используемого ПС большого класса вместимости и одинаковом пробеге).

При расчете затрат на эксплуатацию ТУАХ в сценарии 1 учитывался срок службы аккумуляторного модуля восемь лет. На рис. 4 приведена зависимость изменения годовых эксплуатационных расходов и удельных эксплуатационных расходов, при использо-

вании ТУАХ на рассматриваемых маршрутах, от срока службы аккумуляторного модуля.

Из рис. 4 можно сделать вывод, что даже при сроке службы аккумуляторного модуля менее восьми лет (менее, чем заявлено изготовителем) эксплуатационные расходы, как годовые, так и удельные, в сценарии 1 меньше, чем в сценарии 2. Так, при сроке службы аккумуляторного модуля пять лет, годовые затраты на эксплуатацию ТУАХ составят 793,68 млн руб., удельные — 2,95 руб./место-км, что на 1% и на 6,7% соответственно меньше, чем при эксплуатации автобусов при равных условиях эксплуатации (одинаковом количестве используемого ПС большого класса вместимости и одинаковом пробеге). Однако при увеличении срока полезного использования аккумуляторного модуля до 10 лет можно достичь эффекта в виде снижения годовых эксплуатационных расходов на 6,7% и удельных на 12% при внедрении сценария 1.

Стоимость электробуса с динамической зарядкой, а также стоимость дополнительного оборудования (аккумуляторного модуля) также оказывают влияние

на эксплуатационные расходы. На рис. 5 приведена оценка влияния стоимости электробуса с динамической зарядкой со сроком полезного использования 15 лет (при разных сроках полезного использования аккумуляторных модулей) на годовые эксплуатационные расходы для сценария 1.

Из рис. 5 можно сделать вывод, что замена автобусов на ТУАХ (сценарий 1) принесет эффект в виде снижения эксплуатационных расходов (затраты на эксплуатацию автобусов по сценарию 2 составляют

801,67 млн руб. (см. табл. 2)) при использовании ТУАХ стоимостью не более: 39,2 млн руб. при сроке полезного использования аккумулятора 5 лет; 44,3 млн руб. при сроке полезного использования аккумулятора 8 лет и 46,4 млн руб. при сроке полезного использования аккумулятора 10 лет.

При этом на рис. 5 видно, что снижение стоимости используемого ТУАХ на рассматриваемых маршрутах с 38,2 до 25,7 млн руб. со сроком полезного использования аккумуляторного модуля 8 лет, позволит



Рис. 4. Зависимость затрат на эксплуатацию электробусов с динамической зарядкой (ТУАХ) от срока службы аккумуляторного модуля

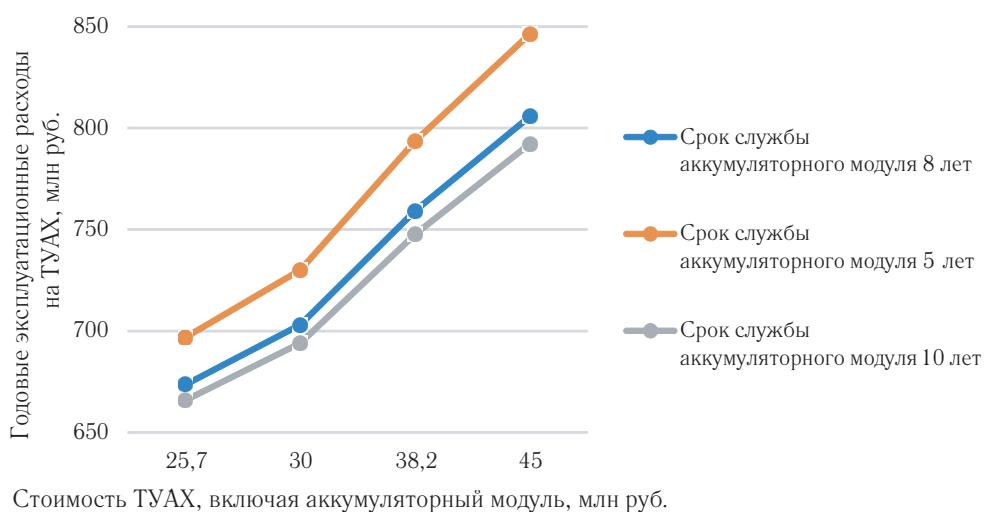


Рис. 5. Зависимость затрат на эксплуатацию ТУАХ (сценарий 1) от стоимости ТУАХ со сроком полезного использования 15 лет, включая стоимость аккумуляторного модуля при разных сроках полезного использования

снизить эксплуатационные расходы на 85,61 млн руб. в год (11,3%), а значит получить эффект от замены дизельных автобусов большого класса вместимости на ТУАХ аналогичного класса вместимости в виде снижения эксплуатационных расходов на 16%.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что замена автобусов, работающих на 4 маршрутах (6, 47, 105 и 128) на электробусы с динамической зарядкой (сценарий 1) приводит к стабильному эффекту, за счет снижения затрат перевозчика на эксплуатацию ПС.

## Выводы

Эффект от эксплуатации электробусов с динамической зарядкой (или ТУАХ) включает следующие основные факторы:

1. Экономия капитальных затрат и эксплуатационных расходов за счет снижения протяженности контактной сети и возможности отказа от строительства новых участков.

2. Снижение затрат перевозчика на эксплуатацию подвижного состава.

Исследование показало, что замена автобусов (среднего и большого класса вместимости) на ТУАХ большого класса вместимости со сроком полезного использования аккумуляторного модуля 8 лет, на 4 рассматриваемых маршрутах, позволит получить экономический эффект в виде снижения годовых эксплуатационных расходов на 5,3%, а удельных ( себестоимость 1 место-км) на 10,4%.

Проведенное исследование также позволило выявить зависимость стабильного увеличения эффекта

от увеличения срока службы дополнительного оборудования, устанавливаемого на ТУАХ для обеспечения возможности автономного хода. Так, увеличение срока полезного использования аккумуляторного модуля до 10 лет, позволит достичь эффект в виде снижения затрат на эксплуатацию ТУАХ (сценарий 1) годовых на 6,7% и удельных на 12%, а снижение стоимости ТУАХ на 33% позволит увеличить эффект от снижения эксплуатационных расходов до 16% по сравнению с использованием автобусов (сценарий 2) при прочих равных условиях (одинаковое количество используемого ПС, количество выполненных рейсов, пробег и т.п.).

Таким образом, замена автобусов на ТУАХ позволит получить устойчивый экономический эффект, как показало проведенное исследование, даже при том, что троллейбусы (по сравнению с автобусами) требуют наличие инфраструктуры в виде контактных сетей, их обслуживание обходится дешевле и в краткосрочном и в долгосрочном периоде.

3. Повышение эксплуатационной скорости, и, как следствие, снижение затрат времени на перемещение пассажиров.

ТУАХ, благодаря возможности автономного хода и высокой маневренности, способен без замедления проезжать стрелки и пересечения контактной сети, двигаясь с опущенными токоприемными штангами, что позволит увеличить эксплуатационную скорость на маршруте, а значит повысить привлекательность использования таких маршрутов населением.

4. Улучшение экологии городской среды.



## Литература

1. Руководство по устойчивой городской мобильности и территориальному планированию. Содействие активной мобильности. - ЕЭК ООН. - Женева, 2020. - 222 с.- URL: [https://unesco.org/DAM/trans/main/wp5/publications/1922152R\\_web.pdf](https://unesco.org/DAM/trans/main/wp5/publications/1922152R_web.pdf) (дата обращения: 11.12.2024). - Текст : электронный.
2. Синергия концептов развития транспортных систем в условиях современной урбанизации России : монография / И. Н. Пугачев, Ю. И. Куликов, А. Э. Горев [и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. - Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2019. - 211 с. - Текст : непосредственный.
3. Горев, А. Э. Развитие городского пассажирского транспорта / А. Э. Горев, О. В. Попова. - Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. - 2019. - № 2 (81). - С. 45-47.
4. Bus Rapid Transit. Planning Guid / 4-rd edition, 2017. New York: Institute for Transportation & Development Policy, 2017. - 1076 p.
5. M. Bartłomiejczyk, Dynamic Charging of Electric Buses. Gdansk, Poland: Gdansk Univ. Technoligy, Faculty of Electrical and Control Engineering, 2018. [Online]. Available: [https://books.google.cz/books?id=-ziX\\_vQEACAAJ](https://books.google.cz/books?id=-ziX_vQEACAAJ).

6. M. Wołek, M. Wolanski, M. Bartłomiejczyk, O. Wyszomirska, K. Grzelec, and K. Hebel, "Ensuring sustainable development of urban public transport: A case study of the trolleybus system in Gdynia and sopot (Poland)," *J. Cleaner Prod.*, vol. 279, Jan. 2021, Art. no. 123807.
7. Троллейбус с динамической подзарядкой - альтернатива городскому автобусу в агломерациях / А. С. Денисов, А. Р. Асоян, Ю. О. Глушкова, А. В. Пахомова. - Текст : непосредственный // Техническое регулирование в транспортном строительстве. - 2018. - № 1 (27). - С. 80-85. - EDN: YQAOGI.
8. Субботин, М. А. Тенденции развития троллейбусных систем России и мира / М. А. Субботин, Н. А. Субботина. - Текст : непосредственный // Географическое изучение территориальных систем: сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Пермь, 16-17 мая 2019 года / Под редакцией М. Б. Ивановой. - Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. - С. 85-90. - EDN: YTRJIV.
9. Горецкая, А. Г. Особенности экологизации и гуманизации городов / А. Г. Горецкая, В. А. Топорина. - Текст : непосредственный // Естественные и технические науки. - 2018. - № 8 (122). - С. 116-118. - EDN: XYULVR.
10. Парфенов, С. И. Троллейбус с автономным ходом / С. И. Парфенов. - Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. - 2012. - № 3-4 (40-41). - С. 66-67. - EDN: PBZHYR.
11. Коновалова, Т. В. Троллейбусы с автономным ходом в крупных городах / Т. В. Коновалова, А. Ю. Иноземцева. - Текст : электронный // Механика, оборудование, материалы и технологии: электронный сборник научных статей по материалам третьей международной научно-практической конференции, Краснодар, 29-30 октября 2020 года. - Краснодар: ООО «Принт Терра», 2020. - С. 1077-1080. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44736093&ysclid=m4jro4ojyq775747416>. - EDN: UDFXKM.
12. Цариков, А. А. Троллейбусы с возможностью автономного хода и их влияние на проектирование маршрутной сети городского пассажирского транспорта / А. А. Цариков, В. Г. Бондаренко, А. В. Склянний. - Текст : непосредственный // Инновационный транспорт. - 2022. - № 4 (46). - С. 23-30. - DOI: 10.20291/2-311-164X-2022-4-23-30. - EDN: GJXKSW.
13. I. Diab, R. Eggemont, G. R. Chandra Mouli and P. Bauer, «An Adaptive Battery Charging Method for the Electrification of Diesel or CNG Buses as In-Motion-Charging Trolleybuses», in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 3, pp. 4531-4540, Sept. 2023, doi: 10.1109/TTE.2023.3243022.
14. Эффективность автоматизированного управления транспортными средствами в трамвайных системах / А. Э. Горев, О. В. Попова, Д. Г. Плотников, Е. М. Олещенко. - Текст : непосредственный // Автоматика на транспорте. - 2024. - Т. 10, № 1. - С. 32-51. - DOI 10.20295/2412-9186-2024-10-01-32-51. - EDN: TJYFGD.
15. W. Hu, C. Wang and X. Zuo, "An Ant Colony Optimization based Approach to Adjust Public Transportation Network," 2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Wellington, New Zealand, 2019, pp. 2575-2580, doi: 10.1109/CEC.2019.8790117.
16. «Об утверждении Порядка определения начальной (максимальной) цены контракта, а также цены контракта, заключаемого с единственным поставщиком (подрядчиком, исполнителем), при осуществлении закупок в сфере регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом» : Приказ Минтранса РФ от 20 октября 2021 г. № 351. - Текст : непосредственный.