

УДК 681.11.031.1

Анализ технических характеристик тяговых аккумуляторных батарей городского наземного электрического транспорта

А. Н. Сычугов, В. Д. Быльцева, А. В. Курков

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сычугов А. Н., Быльцева В. Д., Курков А. В. Анализ технических характеристик тяговых аккумуляторных батарей городского наземного электрического транспорта // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 99–111. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-99-111

Аннотация

Цель: исследование технических характеристик накопителей электрической энергии, используемых на городском наземном электрическом транспорте Санкт-Петербурга, направленное на выявление инновационных решений для повышения производительности и стабильности функционирования транспортных систем города. **Методы:** использован комплексный подход, включающий проведение сравнительного анализа ключевых показателей трех типов тяговых аккумуляторных батарей, которые эксплуатируются на городском наземном электрическом транспорте: никель-марганец-кобальтовые (NMC), литий-железо-фосфатные (LiFePO₄) и литий-титанатные (LTO). Оценивались основные характеристики, такие как продолжительность эксплуатации накопителей, объем запасенной энергии, количество возможных циклов заряда-разряда, скорость восполнения и расходования электроэнергии, устойчивость к пожарам и экономические факторы. Особое внимание было уделено перспективам внедрения троллейбусов с увеличенным автономным ходом (ТУАХ) на улицах города Санкт-Петербурга. **Результаты:** доказано превосходство литий-железо-фосфатных тяговых аккумуляторных батарей над остальными видами накопителей, обусловленное их длительным сроком службы, стабильностью рабочих характеристик и оптимальным балансом цены и качества. Были определены приоритетные направления дальнейшей разработки накопителей электрической энергии, включающие рост удельной энергоемкости, минимизацию теплоотвода при заряде, повышение пожаростойкости материалов, соблюдение принципов экологически безопасной переработки отходов и уменьшение расходов на эксплуатацию накопителей. **Практическое значение:** выводы данного исследования служат основой для принятия обоснованных решений относительно выбора конкретного типа тяговой аккумуляторной батареи для последующего оснащения ими городского наземного электрического транспорта города Санкт-Петербурга. Накопители электрической энергии также содействуют формированию стратегии модернизации существующей транспортной инфраструктуры города, способствуя снижению энергопотребления, улучшению экологической обстановки и устойчивого развития города.

Ключевые слова: городской наземный электрический транспорт, троллейбусы, трамвайные вагоны, накопители электрической энергии, городская инфраструктура

В Российской Федерации в последнее время реализуется комплексная программа развития и модернизации городского наземного электрического транспорта. В ходе анализа аналитического отчета «Троллейбусный транспорт в России. Состояние и перспективы рынка» видно, что на улицах городов идет преобладание электробусов и газовых автобусов по сравнению с троллейбусами.

Связано это с неактуальными экономическими расчетами и транспортными критериями, а также с решением о частичном или даже полном сокращении троллейбусного сообщения в ряде городов России.

В табл. 1 показаны сравнение видов транспорта, расчеты разных видов транспортных средств (далее — ТС), где был взят за основу стандартный маршрут подвижного состава протяженностью 10 км только в одну сторону. Хочется отметить, что троллейбус с увеличенным автономным ходом (далее — ТУАХ) движется на протяжении заданного маршрута и под контактной сетью (далее — КС) и с помощью накопителя электроэнергии. Для преодоления того же маршрута электробусом путь должен быть оснащен зарядными станциями.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение видов транспорта

№ п/п	Статьи затрат	Ед. изм.	Автобус (ДТ)	Автобус (КПГ)	Троллейбус без УАХ	Троллейбус с УАХ	Электробус
1	Техническое обслуживание и ремонт	тыс. руб.	15 540,00	17 879,20	16 275,00	16 800,00	27 195,00
2	Топливо/электроэнергия на движение	тыс. руб.	21 782,30	12 119,10	10 710,00	10 710,00	10 710,00
3	Цена инфраструктуры и ее обслуживания	тыс. руб.	0,00	0,00	4 567,50	2 283,80	0,00
4	Цена замены АКБ	тыс. руб.	0,00	0,00	0,00	5 500,00	0,00
5	Цена ТС с учетом обновления (с субсидией для автобусов с комбинированным газом)	тыс. руб.	28 071,40	37 757,10	16 500,00	21 000,00	36 800,00
Итого на ед.		тыс. руб.	65 393,70	67 755,40	48 052,50	56 293,80	74 705,00
Итого в расчете на 1 км пробега		руб/км	62,30	64,50	45,80	53,60	71,10

Из данной таблицы видно, что эксплуатация обычного троллейбуса и ТУАХ обходится дешевле, чем эксплуатация других транспортных средств.

Город Санкт-Петербург может по праву считаться лидером троллейбусного движения, так как в эксплуатации находится более 850 троллейбусов, а протяженность маршрутной сети составляет около 700 км. Одним из перспективных направлений развития троллейбусного сообщения является реализация СПб ГУП «Горэлектротранс» программы по расширению маршрутной сети троллейбуса с использованием троллейбуса с увеличенным автономным ходом. Преимущества накопителей электрической энергии представлены в виде таблицы на рис. 1.



Рис. 1. Преимущества накопителей электрической энергии

Эти преимущества делают системы накопления электрической энергии важным элементом устойчивого развития городского наземного электрического транспорта города и области. Они способствуют повышению эффективности работы электрического транспорта, улучшению качества жизни горожан за счет уменьшения загрязнения воздуха и снижения уровня шума [1–2].

ТУАХ — это подвижной состав, получающий электроэнергию от внешнего источника питания через контактную сеть с помощью токоприемника. Данный тип транспортного средства оснащается тяговыми аккумуляторными батареями (далее — ТАБ). Зарядка накопителей осуществляется во время движения ТС под КС. В табл. 2 представлены модели троллейбусов, эксплуатирующиеся в СПб ГУП «Горэлектротранс».

В ходе анализа табл. 2 видно, что обычные троллейбусы составляют большую часть троллейбусных парков СПб ГУП «Горэлектротранс» — 508 ед., в отличие от ТУАХ (326 ед.). Преимущества ТУАХ по сравнению с другим видом транспорта представлены на рис. 2.

ТАБЛИЦА 2. Модели троллейбусов в СПб ГУП «Горэлектротранс»

№ п/п	Модель	Привод	Мощность ТЭД, кВт	Конструкционная скорость, км/ч	Габариты (длина, высота, ширина), мм	Вместимость, чел.	Наличие автономного хода (да/нет)	Тип ТАБ	Длительность автономного хода, км	Всего ПС в парке ГЭТ, ед.
1	АКСМ-32100D («Ольгерд») АХ	ДК-211БМ	170	60	12 500 2550 3680	80	да	Никель-марганец- кобальтовая батарея (NMC)	20	97
		Škoda	180							
		АНТ-155	185							
		ДТА-1У1	180							
		АТЧД-250	150							
2	АКСМ-321	8МЛ/3550	180	70	12 307 3666 2500	155	нет	–	–	96
			150							
3	АКСМ-32100D	ДК-215Б	150	60	12 307 3666 2500	115	да	Литий-железо- фосфатная батарея (LiFePO4)	25	35
			115							
4	6281.00 «Адмирал»	КРА-200М4Н	115	80	12 375 3470 2500	96	нет	–	–	87
		КРА-280–2М4У2	180							
		АТ250L4У2	120							
		АТ250LВ4У2	180							
		ДТА-3У1	170							
5	5298-0000010-01 «Авангард»	ДТА-У1У	180	70	12 300 3370 2530	107	нет	–	–	166
			180							
6	5298-0000010-01 «Авангард АХ»	ДТА-У1У	180	70	12 300 3370 2530	107	да	Никель-марганец- кобальтовая батарея (NMC)	10 и 25	10 км — 35 25 км — 50 Всего: 85
			180							
7	6215-0000010-01 «Премьер»	ДК-211БМ	170	70	18 575 3370 2530	185	нет	–	–	23
			180							

Окончание ТАБЛИЦЫ 2

№ п/п	Модель	Привод	Мощность ТЭД, кВт	Конструкционная скорость, км/ч	Габариты (длина, высота, ширина), мм	Вместимость, чел.	Наличие автономного хода (да/нет)	Тип ТАБ	Длительность автономного хода, км	Всего ПС в парке ГЭТ, ед.
8	43303 (БКМ)	Škoda	210	60	18750 2862 2500	162	нет	–	–	20
9	ТРОЛЗА-5265.08	ТАД280L4У2	180	60	11665 3470 2550	80	да	Литий-железо-фосфатная батарея (LiFePO4)	20	79
10	ТРОЛЗА-5265.02	ДТА-1У1	180	60	12335 3470 2550	100	да	Литий-титанатная батарея (LTO)	15	10
11	Тролза-5265 «Мегаполис»	ТАД280L4	180	60	12660 3470 2550	100	нет	–	–	113
12	СИНАРА-6254	ДТА-3У1	170	70	12582 3650 2550	90	да	Никель-марганец-кобальтовая батарея (NMC)	25	20
13	ВМЗ-5298-01	ДК-211БМ	170	70	12950 3370 2470	114	нет	–	–	3
		ТАД-280	180							

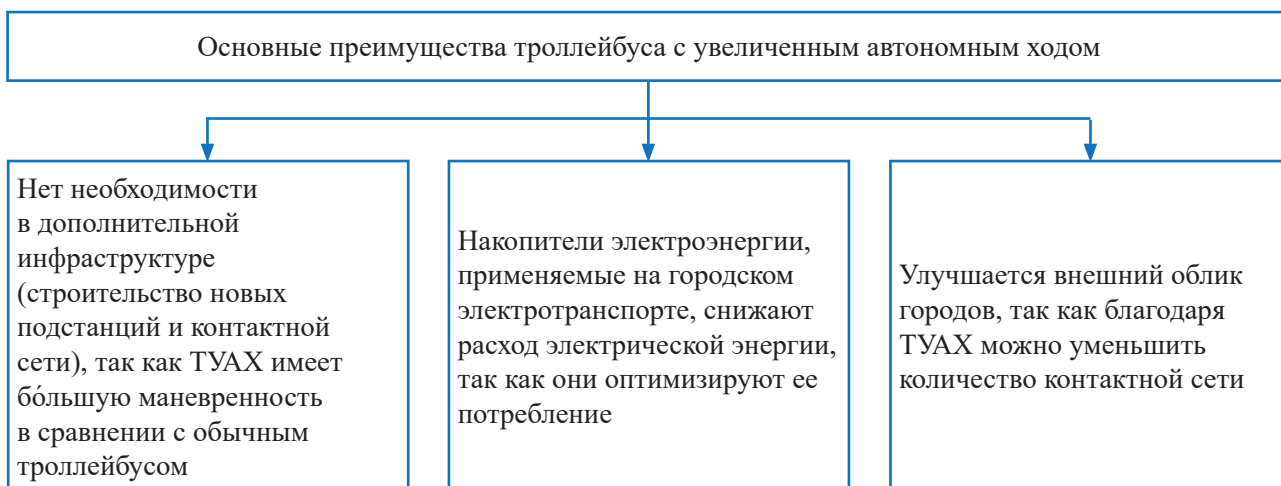


Рис. 2. Преимущества троллейбуса с увеличенным автономным ходом

Использование системы автономного хода представляет собой передовое решение, которое имеет ряд достоинств и способствует развитию современной городской инфраструктуры городов.

СПб ГУП «Горэлектротранс» использует для системы автономного хода тяговые аккумуляторные батареи, чаще всего типа никель-марганец-кобальтовые (NMC) и литий-железо-фосфатные (LiFePO₄). На рис. 3 показана диаграмма тяговых аккумуляторных батарей, которые используются на подвижном составе СПб ГУП «Горэлектротранс».

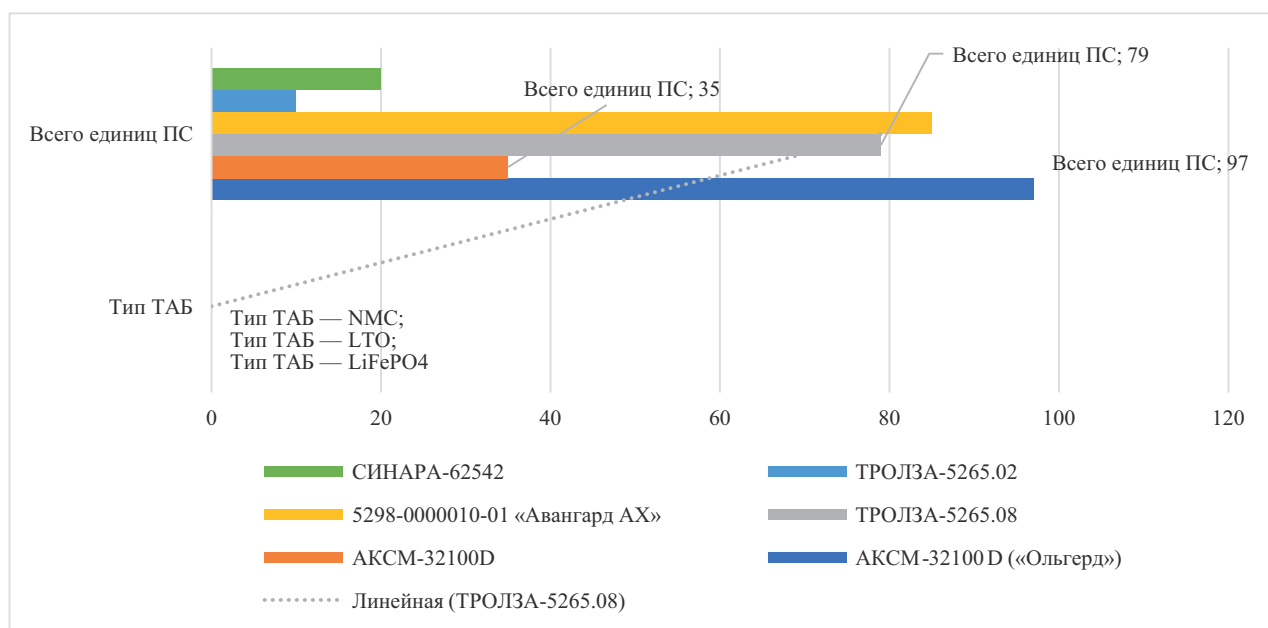


Рис. 3. Тяговые аккумуляторные батареи, которые используются на подвижном составе СПб ГУП «Горэлектротранс»

Характеристики тяговых аккумуляторных батарей представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Характеристики тяговых аккумуляторных батарей

Тип накопителя	Никель-марганец-кобальтовая ТАБ	Литий-железо-фосфатная ТАБ	Литий-титанатная ТАБ
Производитель	EnerZ	ООО «Лиотех-Инновации»	«Драйв-Электро»
Емкость, А·ч	64	170	80
Масса комплекта, кг	640	1250	680
Максимальный ток, А	Зарядка — 320, Разрядка — 448	Зарядка — 170, Разрядка — 400	Зарядка — 120, Разрядка — 240
Номинальное напряжение, В	650	460	440
Тип охлаждения/ подогрева	Система кондиционирования воздухом из салона	Система кондиционирования воздухом из атмосферы	С помощью рабочей жидкости
Пробег в режиме автономного хода при номинальной нагрузке, км	7,5–10	Не менее 7,5	
Время зарядки, мин	50		
Срок службы, лет	8		
Масса ТАБ, кг	320	650	342
Удельная энергия, Вт·ч/кг	150–220	180–200	1400
Преимущества	— высокое напряжение на выходе ТАБ; — широкий диапазон рабочей температуры без дополнительных систем	— низкая цена; — высокая емкость	— короткая продолжительность цикла зарядки; — надежная и эффективная система терморегулирования
Недостатки	низкая устойчивость к перепадам температуры	— в составе имеется система охлаждения ТАБ, требующая дополнительных затрат; — пластиковый корпус ячеек ТАБ ухудшает теплоотвод	высокая цена

При выборе накопителей электрической энергии, применяемых на городском наземном электрическом транспорте, необходимо учитывать их основные технические характеристики, чтобы обеспечить бесперебойную работу и долговечность системы питания города [3–4].

Часто используемым типом накопителей на городском транспорте являются литий-железо-фосфатные (LiFePO₄) тяговые аккумуляторные батареи, так как по сравнению с аналогами они более безопасны (менее склонны к перегреву), имеют высокую долговечность (высокий цикл прочности) и обладают стабильным напряжением на протяжении всего цикла разрядки [5–6].

Они имеют маленькую энергетическую плотность, что делает их массогабаритными, но в то же время дорогостоящими. Литий-железо-фосфатные тяговые аккумуляторные батареи применяются на ТУАХ модели ТРОЛЗА-5265.08, показанном на рис. 4.



Рис. 4. Троллейбус модели ТРОЛЗА-5265.08 (Фото О. В. Соловьёва)

Преимуществом NMC-батареи является высокая энергетическая плотность, то есть способность запасать большое количество энергии по сравнению с аналогами, и быстрая скорость зарядки. Также данный тип ТАБ способен на протяжении долгого времени сохранять свою емкость и производительность.

На рис. 5–6 показаны троллейбусы модели АКСМ-32100D и 5298-0000010-01 «Авангард» с использованием никель-марганец-кобальтовых батарей.



Рис. 5. Троллейбус модели АКСМ-32100D (фото О. В. Соловьёва)



Рис. 6. Троллейбус модели 5298-0000010-01 «Авангард» (фото О. В. Соловьева)

Еще одним типом ТАБ являются ЛТО-батареи, которые популярны благодаря быстрой скорости заряда и разряда, большому диапазону рабочих температур и долговечности. Из недостатков можно отметить их низкую энергетическую плотность, плохие массогабаритные показатели и высокую стоимость изготовления комплектующих батарей [7–10].

На рис. 7 показан троллейбус модели ТРОЛЗА-5265.02 «Мегаполис» с использованием литий-титанатных батарей.



Рис. 7. Троллейбус модели ТРОЛЗА-5265.02 «Мегаполис»
(фото СПб ГУП «Горэлектротранс»)

Выводы

Наиболее распространенным типом аккумуляторов, используемым на троллейбусах с увеличенным автономным ходом, является LiFePO_4 , который отличается высокой безопасностью, долговечностью, хорошим соотношением цены и качества, широким диапазоном рабочих температур и экологичностью.

Из перечисленных тяговых аккумуляторных батарей самые большие проблемы в эксплуатации отличают литий-титанатную батарею, так как она имеет низкую энергетическую плотность, теряет эффективность при глубоких разрядах и сложна в интеграции с существующей инфраструктурой. Эти недостатки делают эксплуатацию ЛТО-аккумуляторов менее привлекательной по сравнению с аналогами. Ключевые проблемы, связанные с тяговыми аккумуляторными батареями, которые нужно решить, представлены на рис. 8.

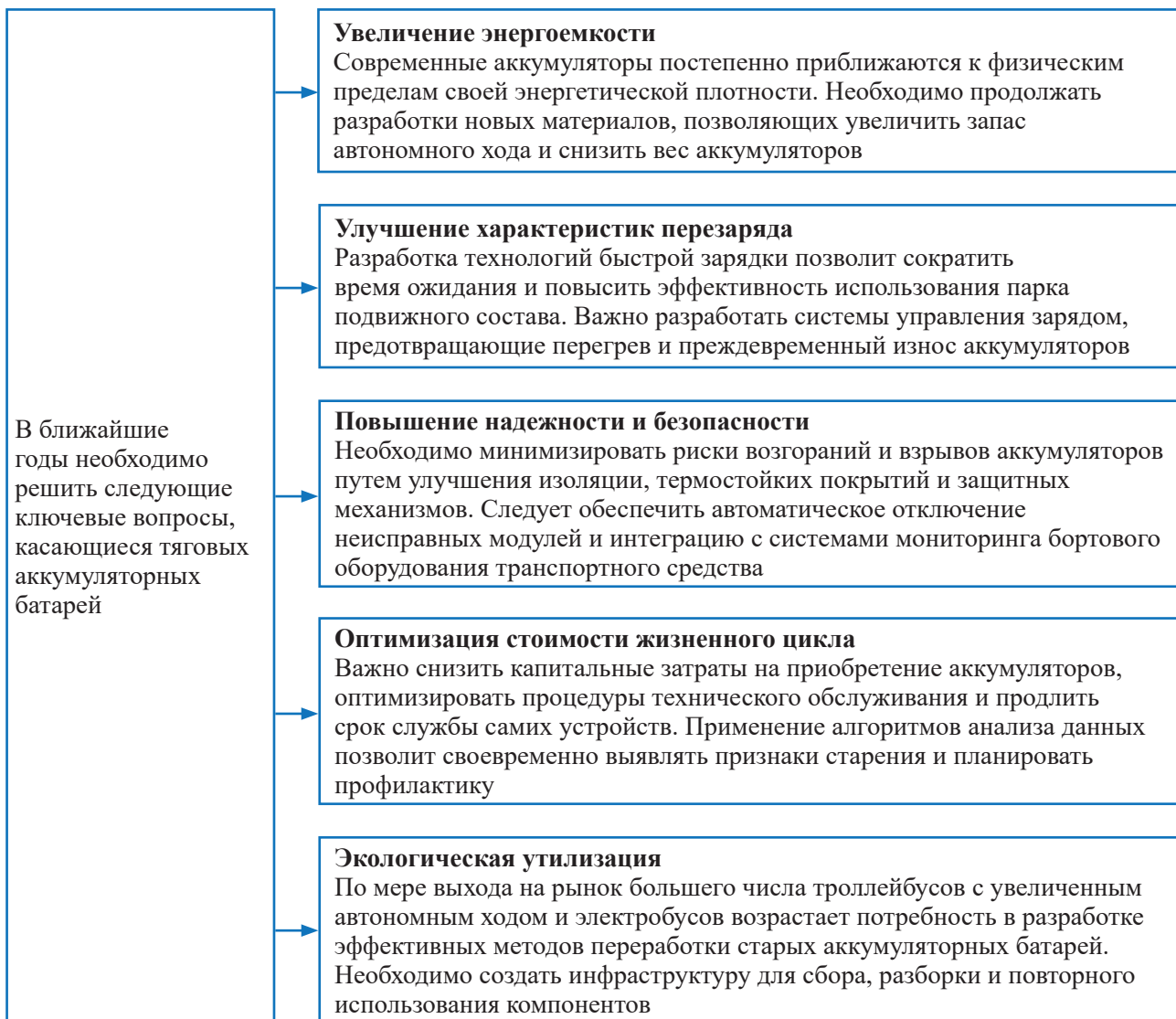


Рис. 8. Ключевые проблемы тяговых аккумуляторных батарей

Решив указанные задачи, общественный транспорт станет более экологически чистым, безопасным и доступным, способствуя устойчивому развитию транспортной отрасли страны.

Современный подвижной состав оснащен высокоэффективными и мощными электродвигателями, позволяющими реализовать интенсивный разгон и плавное

электрическое торможение практически до нулевой скорости. Однако высокая мощность требует большой электрооснащенности тяговой сети, что создает повышенную нагрузку на существующие контактные системы электроснабжения и тяговые подстанции, построенные несколько десятилетий назад.

Таким образом, внедрение современного подвижного состава предъявляет серьезные требования к состоянию инфраструктуры города, необходимость своевременной модернизации которой становится приоритетной задачей городского хозяйства.

Список источников

1. Козлов С. В., Киндряшов А. Н., Соломин Е. В. Анализ эффективности систем накопления энергии. Южно-Уральский государственный университет // Основные проблемы энергетики и альтернативной энергии. 2015. С. 29–34.
2. Эволюция конструкции подвижного состава легкорельсового транспорта в Санкт-Петербурге / А. А. Воробьев [и др.] // Известия ПГУПС. 2020. Т. 17, № 1. С. 62–70.
3. Викулов И. П., Быльцева В. Д. Целесообразность применения рельсового транспорта в инфраструктуре городов // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сб. трудов. Т. 1. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. 84–86 с.
4. Быльцева В. Д., Изварин М. Ю., Ким К. К. Системы автономного хода городского электрического транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 300–319. DOI: 10.17816/transsyst634812
5. Евстафьев А. М. Применение гибридных технологий в тяговом подвижном составе // Бюллетень результатов научных исследований. 2018. Вып. 3. С. 27–38.
6. Евстафьев А. М. Оценка энергоемкости бортового накопителя энергии для тягового подвижного состава // Бюллетень результатов научных исследований. 2018. Вып. 2. С. 7–17.
7. Быльцева В. Д., Изварин М. Ю., Ким К. К. Системы автономного хода городского электрического транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10, № 3. С. 300–319. DOI: 10.17816/transsyst634812.
8. Евстафьев А. М. Повышение энергетической эффективности электрического подвижного состава: дисс. ... д-ра техн. наук. СПб., 2018. EDN ZCZMUV.
9. Евстафьев А. М. Применение гибридных технологий в тяговом подвижном составе // Бюллетень результатов научных исследований. 2018. Вып. 2. С. 27–38.
10. Парфенов С. И. Троллейбус с автономным ходом // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 3–4. С. 40–41. EDN PBZHNR.

Дата поступления: 05.02.2026

Решение о публикации: 04.03.2026

Контактная информация:

СЫЧУГОВ Антон Николаевич — канд. техн. наук; sychugov@pgups.ru

БЫЛЬЦЕВА Василиса Дмитриевна — аспирант; vasilisa7887@bk.ru

КУРКОВ Александр Валентинович — канд. техн. наук; a.v.kurkov-spb@yandex.ru

Analysis of traction battery performance in urban electric transport

A. N. Sychugov, V. D. Byltseva, A. V. Kurkov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Sychugov A. N., Byltseva V. D., Kurkov A. V.* Analysis of traction battery performance in urban electric transport // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 99–111. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-99-111. (In Russian)

Abstract

Objective: to investigate the performance of battery energy storage systems deployed in St. Petersburg's urban ground electric transport, aimed at identifying innovative measures to improve system performance and operational reliability of the city transport systems. **Methods:** a comprehensive comparative analysis was undertaken, focusing on the key performance parameters of three traction battery types employed in urban electric transport: nickel-manganese-cobalt (NMC), lithium-iron-phosphate (LiFePO₄), and lithium-titanate (LTO). Key parameters were assessed, including service life of the storage systems, energy storage capacity, cycle life (number of charge-discharge cycles), charge and discharge rates, fire safety attributes, and economic factors. Special emphasis was placed on the prospects for deploying trolleybuses with an extended off-wire (autonomous) range (ERTs) on the streets of St. Petersburg. **Results:** the findings have demonstrated the superiority of lithium-iron-phosphate (LiFePO₄) traction batteries relative to other types of batteries due to their prolonged service life, stable operational characteristics, and an advantageous balance of cost and performance. Priority areas for further development of electrical energy storage devices have been identified, including increased specific energy density, reduced heat generation during charging, improved thermal and fire resistance of materials, ensuring environmentally responsible recycling of end-of-life units, and lowering lifecycle operating costs of the storage systems. **Practical significance:** the findings of this study provide a basis for informed decision-making regarding the selection of a particular traction-battery type for equipping urban electric transport in St. Petersburg. Energy storage systems likewise support the formulation of a modernization strategy for the city's existing transport infrastructure, facilitating reduced energy consumption, improved environmental quality, and advancement toward sustainable development.

Keywords: urban electric transport, trolleybuses, street tram cars, electric energy storage systems, urban infrastructure

References

1. Kozlov S.V., Kindryashov A.N., Solomin E.V. Analiz effektivnosti sistem nakopleniya energii. Yuzhno-Ural'skij gosudarstvennyj universitet // Osnovnye problemy energetiki i al'ternativnoj energii. 2015. S. 29–34. (In Russian)
2. Evolyutsiya konstruksii podvizhnogo sostava legkorel'sovogo transporta v Sankt-Peterburge / A. A. Vorob'ev [i dr.] // Izvestiya PGUPS. 2020. T. 17, no. 1. S. 62–70. (In Russian)
3. Vikulov I.P., Byl'tseva V.D. Tselesoobraznost' primeneniya rel'sovogo transporta v infrastrukture gorodov // III Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sb. trudov. T. 1. SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2021. 84–86 s. (In Russian)
4. Byl'tseva V.D., Izvarin M.Yu., Kim K.K. Sistemy avtonomnogo khoda gorodskogo elektricheskogo transporta // Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii. 2024. T. 10. № 3. S. 300–319. DOI: 10.17816/transsyst634812. (In Russian)

5. Evstaf'ev A.M. Primenenie gibridnykh tekhnologij v tyagovom podvizhnom sostave // Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij. 2018. Vyp. 3. S. 27–38. (In Russian)
6. Evstaf'ev A.M. Otsenka energoemkosti bortovogo nakopitelya energii dlya tyagovogo podvizhnogo sostava // Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij. 2018. Vyp. 2. S. 7–17. (In Russian)
7. Byl'tseva V. D., Izvarin M. Yu., Kim K.K. Sistemy avtonomnogo khoda gorodskogo elektricheskogo transporta // Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii. 2024. T. 10, no. 3. S. 300–319. DOI: 10.17816/transsyst634812. (In Russian)
8. Evstaf'ev A.M. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti elektricheskogo podvizhnogo sostava: diss. ... d-ra tekhn. nauk. SPb., 2018. EDN ZCZMUV. (In Russian)
9. Evstaf'ev A.M. Primenenie gibridnykh tekhnologij v tyagovom podvizhnom sostave // Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij. 2018. Vyp. 2. S. 27–38. (In Russian)
10. Parfenov S.I. Trollejbus s avtonomnym khodom // Transport Rossijskoj Federatsii. 2012. No. 3–4. S. 40–41. EDN PBZHHR. (In Russian)

Received: 05.02.2026

Accepted: 04.03.2026

Author's information:

Anton N. SYCHUGOV — PhD in Engineering, Associate Professor; sychugov@pgups.ru

Vasilisa D. BYLTSEVA — Postgraduate Student; vasilisa7887@bk.ru

Aleksandr V. KURKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; a.v.kurkov-spb@yandex.ru