

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление –Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst634812>

© В.Д. Быльцева, М.Ю. Изварин, К.К. Ким

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ХОДА ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Система автономного хода (САХ) в городском электрическом транспорте играет важную роль, так как она обеспечивает движение подвижного состава в случае «потери» доступа к контактной сети из-за аварийных ситуаций или ремонтных работ. Благодаря САХ, транспортные средства могут продолжать свое движение с установленными скоростями и обеспечивать перевозку пассажиров с высоким уровнем комфорта и безопасности.

Автономный ход позволяет сохранить мобильность транспортного средства и обеспечивает его необходимую доступность для пассажиров даже при отсутствии контактной сети. САХ повышает надежность и эффективность работы городского электрического транспорта, обеспечивая более стабильное функционирование системы перевозок в городе.

Целью данной статьи является обзор транспортных систем городского электрического транспорта и потенциала их развития за счет внедрения системы автономного хода на подвижном составе.

Ключевые слова: система автономного хода; городской электрический транспорт; аккумуляторная батарея; суперконденсатор; троллейбус; трамвай.

Как цитировать:

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

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© V.D. Byltseva, M.Yu. Izvarin, K.K. Kim

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)**AUTONOMOUS RUNNING SYSTEMS
OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT**

The autonomous running system (ARS) is crucial for urban electric transport, ensuring the movement of electric rolling stock even when access to the contact network is lost owing to emergencies or repair work. Thanks to the ARS, the vehicles can maintain their set speeds, providing passengers with comfortable and safe movements.

The autonomous running allows vehicles to remain mobile and accessible to passengers, even without power supply from the contact network. ARS increases the reliability and efficiency of urban electric transport, ensuring a more stable operation of the transportation system in the city.

This article aims to review the transport systems of urban electric transport and assess their development potential by integrating an ARS into the rolling stock.

Keywords: autonomous running system; urban electric transport; rechargeable battery; supercapacitor; trolleybus; tram.

To cite this article:

Byltseva VD, Izvarin MYu, Kim KK. Systems of autonomous running of urban electric transport. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(3):300–319. doi: 10.17816/transsyst634812

ВВЕДЕНИЕ

Использование системы автономного хода (САХ) на городском электрическом транспорте имеет множество преимуществ:

1. открытие новых и изменение старых маршрутов без строительства тяговых подстанций и контактной сети, т.е. повышение гибкости маршрутной сети из-за возможности бесконтактного движения транспортного средства;
2. снижение расхода электроэнергии, потребляемой подвижным составом: использование накопителей электрической энергии, таких как суперконденсаторы и/или аккумуляторные батареи, помогает оптимизировать потребление энергии и делает городской электрический транспорт более энергоэффективным;
3. отсутствие контактной сети оказывает положительное влияние на облик городов;
4. возможность применения рекуперации с отдачей энергии в накопитель. В системе электроснабжения постоянного тока классическая рекуперация возможна только при наличии потребителя в сети. При отсутствии потребителя, каковым обычно является подвижной состав в режиме тяги, рекуперация становится невозможной. Наличие накопителя-потребителя полностью решает эту проблему.

Таким образом, использование САХ на подвижном составе городского электрического транспорта представляет собой инновационное решение, которое имеет множество практических преимуществ и способствует развитию устойчивой и современной городской инфраструктуры. Различным аспектам использования САХ на городском электротранспорте и посвящена настоящая работа.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТУАХ В ГОРОДАХ С СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТРОЛЛЕЙБУСНОЙ СИСТЕМОЙ

Замена либо дополнение парка традиционных троллейбусов с питанием от контактной сети электробусами с динамической зарядкой (называемыми также троллейбусами с увеличенным автономным ходом – ТУАХ) – очередной шаг в сторону повышения надежности и экономичности городского безрельсового электротранспорта. Использование ТУАХ улучшит экологическую обстановку в городах, так как часть пассажирооборота перейдет с автобусов на электротранспорт, что позволит сократить выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду и уменьшить зависимость от нефтепродуктов.

Использование существующей троллейбусной инфраструктуры для заряда накопителей энергии электробусов экономит средства на строительство новых зарядных станций, необходимых для электробусов иных типов. Однако, переход даже на такие электробусы требует значительных инвестиций в обновление парка электротранспорта и инфраструктуры.

Необходимо учитывать технические особенности и безопасность систем заряда подвижного состава, но, в целом, переход на электробусы с динамической зарядкой – важный шаг в направлении устойчивого развития городского электротранспорта. Электробус с динамической зарядкой представляет собой троллейбус, на котором кроме традиционного для такого транспортного средства электрооборудования (токоприемники, тяговый двигатель, система управления на основе электронного преобразователя) установлен еще и накопитель электроэнергии – тяговая аккумуляторная батарея (ТАБ) или конденсаторы большой емкости. Это позволяет ему осуществлять движение как на обесточенных участках, так и на участках, вообще не имеющих контактной сети. При этом появляется возможность развивать маршрутную сеть без расширения системы электроснабжения.

В соответствие с современным подходом к классификации, ТУАХ является гибридным транспортным средством, несмотря на то, что он имеет одну силовую установку, так как она может получать питание как от контактной сети, так и от ТАБ, как и контактно-аккумуляторные электровозы железных дорог и метрополитенов [1].

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ХОДА

В СССР в 1930-х –1940-х гг. эксплуатировались троллейбусы ЯТБ-3 с автономным ходом, где в качестве накопителей применялись традиционные аккумуляторные батареи с жидким электролитом. Однако, такая система имела небольшой запас автономного хода – до 8 км, при уменьшенной мощности и скорости движения. Батарея имела большую массу и не могла принимать энергию рекуперации. В дальнейшем такая система ограниченно применялась на грузовых троллейбусах.

Использование накопителей новых типов (литий-ионных аккумуляторных батарей и суперконденсаторов) в САХ увеличивает запас автономного хода подвижного состава, при обеспечении питания тягового электродвигателя номинальной мощностью. Литий-ионные

аккумуляторные батареи имеют несколько разновидностей с различной плотностью запасаемой энергии, скоростью заряда, массогабаритными показателями и ценой. Выбор того или иного накопителя энергии зависит от предполагаемых условий эксплуатации электробуса. Классификация САХ с АКБ представлена на Рис. 1 [2].

Существует три варианта режима заряда аккумуляторных батарей:

- медленный тип заряда, когда подвижной состав заряжается ночью в парке, а днем работает без использования контактной сети. Преимущество такой системы – низкая стоимость электроэнергии, отпускаемой по «ночному» тарифу. В указанных системах используются литий-ионные аккумуляторы с максимальной плотностью энергии и небольшим зарядным током;
- быстрый тип заряда, когда литий-титанатные или другие, допускающие быстрый заряд аккумуляторы транспортного средства заряжаются днем в конечных пунктах маршрута, на зарядных станциях большой мощности;
- динамический тип заряда; в этом случае заряд ТАБ осуществляется во время движения или стоянки с поднятыми токоприемниками. В таких системах могут применяться не только литий-титанатные, но и литий-железофосфатные аккумуляторы.

Выше упоминалось, что основное назначение ТУАХ (электробусов ИМС) – это расширение маршрутной сети электротранспорта без реконструкции системы электроснабжения. Однако, наличие ТАБ позволяет реализовать и другие полезные функции.

В [2] отмечено, что изменения напряжения контактной сети, обусловленные потреблением тока тяговым преобразователем (ТП), напряжения тяговой аккумуляторной батареи и скорости при движении троллейбуса, играют ключевую роль в эффективном функционировании ТУАХ. Эти параметры важны для оптимизации работы системы и обеспечения непрерывной подачи энергии.

При этом тормозные резисторы используются лишь для перевода избыточной энергии, вырабатываемой ТЭД в режиме торможения, в тепловую при условии, что в контактной сети отсутствует потребитель, а допустимый зарядный ток меньше тока на входе инвертора, либо ТАБ полностью заряжена. Указанное обстоятельство обеспечивает наиболее экономичную работу системы электроснабжения и подвижного состава

Графики изменения напряжения контактной сети КС, потребляемого тока, напряжения ТАБ и скорости при движении ТУАХ при питании

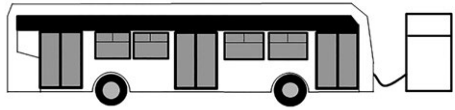
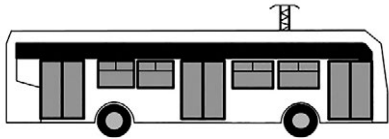
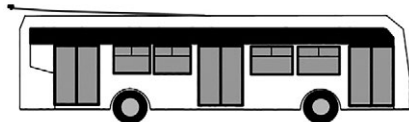
Электробусы с «ночным» зарядом (Over Night Charging, ONC) в парке от промышленной сети 380В и запасом хода на всю смену (200 км) Используются литий-ионные ТАБ с наибольшей плотностью энергии	
Электробусы с подзарядом на маршруте от зарядных станций большой мощности (Opportunity Charging, OPC). В качестве источника может использоваться промышленная сеть 380 В, сеть постоянного тока 550 В или распределительная сеть 10 кВ. Запас хода от 30 до 50 км используются литий-титанатные ТАБ, имеющие меньшую энергоемкость, но допускающие большой зарядный ток. Токоприемник не предназначен для токосъема в движении	
Электробусы с динамической зарядкой, или зарядкой в движении (In-Motion-Charging, IMC). Эти же электробусы известны как ТУАХ. Запас хода в автономном режиме до 30 км. Используются литий-железофосфатные или литий-титанатные ТАБ. Токоприемники штангового типа, токосъем в движении и на стоянке с ограничением по току,	

Рис. 1. Классификация подвижного состава с САХ на основе аккумуляторных батарей

Fig. 1. Classification of ACR with accumulator batteries

от КС и ТАБ представлены на Рис. 2. Как видно, для контактной сети ТУАХ по своему влиянию практически не отличается от обычного ЭПС, однако после режима «автономный ход» увеличивается потребление тока, обусловленное необходимостью заряда ТАБ. Графики данных процессов описаны в [2] по материалам ГУП «Горэлектротранс».

В [2] определено среднее значение тока, потребляемого троллейбусом с автономным ходом при движении в режиме тяги при заряде ТАБ, которое можно вычислить согласно формуле:

$$I_{\text{ТягаСред}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{\text{КС}}(t) dt \approx 70 \text{ A}$$

Таким образом, в [2] выявлено негативное влияние ТУАХ на систему электроснабжения, выражающееся, прежде всего, в неравномерной

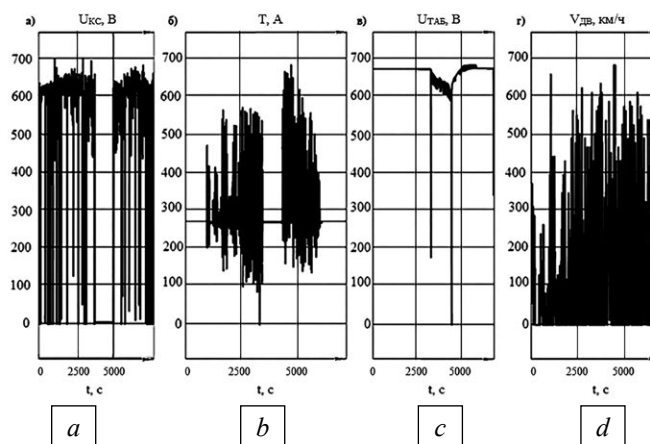


Рис. 2. Графики изменения напряжения КС (a); тока тягового преобразователя (b); напряжения тяговой АБ (c); скорости движения (d) ТУАХ при питании от контактной сети (левая и правая части графика и ТАБ (средняя часть) [2]

Fig. 2. Graphs of changes of the voltage on the CS (a); the current of the traction converter (b); the voltage of the traction motor (c); the speed of movement (d) of the TAB when powered from the contact network (left and right parts of the graph and TAB (middle part) [2]

по времени нагрузке контактной сети и завышении напряжения и предложен вариант решения данной проблемы.

Существуют разработки и проекты более совершенных видов ТУАХ, которые позволяют эффективнее управлять потреблением энергии. Например, использование части энергии из КС и части от ТАБ в режиме тяги может помочь балансировать нагрузку на контактную сеть.

В режиме выбега или стоянки всю потребляемую энергию можно направлять на заряд ТАБ, а в режиме рекуперации – добавлять к ним энергию, восстановленную при рекуперативном торможении. Это все способствует повышению эффективности и уменьшению негативного воздействия на имеющуюся инфраструктуру.

Такой алгоритм позволит выровнять нагрузку на КС и снизить потери в ней. Один из таких вариантов рассмотрен в [2]. Однако, он требует включения в схему дополнительного зарядного преобразователя высокой мощности. Мощность такого преобразователя должна быть примерно в 2 раза выше мощности ТЭД, а неизбежное двойное преобразование энергии снизит общий КПД системы (подобная энергетическая цепь применяется в преобразователях с промежуточным звеном постоянного тока).

При этом, применение схемы с независимым питанием ТАБ и ТЭД не уменьшит КПД, обеспечив при этом алгоритм выравнивания нагрузки

на сеть, не прибегая к ТАБ, как к постоянному источнику энергии (в режиме тяги – источник, в режиме выбега и торможения – потребитель (накопитель)).

Использование алгоритма с распределением нагрузки между ТАБ и КС позволяет сократить количество бросков тока в системе электроснабжения при пуске и снизить максимальные значения токов, потребляемых из КС, сделать нагрузку на систему электроснабжения более равномерной. Это позволит в будущем увеличить расстояние между подстанциями, что в совокупности с автономным ходом сделает систему электроснабжения дешевле. Можно даже осуществить режим аварийного питания КС, от которой питаются не только ТУАХ, но и обычные троллейбусы, например, вовремя, так называемых «блэкаутов», аварийных отключений на ЛЭП системы внешнего электроснабжения, что повысит надежность троллейбусного транспорта в целом.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ХОДА БЕЗРЕЛЬСОВОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Современные и перспективные аккумуляторные батареи высокой емкости, применяемые для оборудования ТУАХ, позволяют значительно расширить полигон эксплуатации безрельсового электротранспорта.

Однако, они требуют принципиально нового, комплексного подхода. Последний заключается в том, что внедрение не должно заканчиваться выходом на обычные и удлиненные маршруты ТУАХ. Вся система нового городского электротранспорта, включая зарядные мощности, оборудование для ремонта и обслуживания в парках, установка систем постановки штанг на КС должна рассчитываться, и внедряться одновременно или поэтапно, как новая транспортная система.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ РЕЛЬСОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА С АВТОНОМНЫМ ХОДОМ

Одним из видов городского электротранспорта является метрополитен. Одним из основных отличий от наземного электротранспорта является то, что питание контактной сети осуществляется постоянным током с номинальным значением напряжения 750 В (на фидере подстанции 825 В). В ночное время в тоннелях производятся работы (в частности, мойка водой), поэтому в целях безопасности с контактного рельса снимают напряжение. Однако, при этом необходимо перемещать служебный

самоходный подвижной состав, грузы и персонал по путям, выполнять маневровую работу на путях депо, переставлять неисправные вагоны.

С этой целью в метрополитене используются контактно-аккумуляторные электровозы, которые фактически представляют собой ЭПС с автономным ходом с мощной ТАБ, состоящий из 360 последовательно включенных аккумуляторов ТПЖН-550. Общее напряжение батареи составляет 400 В, что равно примерно половине напряжения контактного рельса. В начале 1980-х гг. кафедрой «Электрическая тяга» ЛИИЖТа (ПГУПС) совместно с ПКТБ Ленинградского метрополитена был создан контактно-аккумуляторный электровоз Эка-07Т с рекуперативным торможением, предназначенный для работы на парковых путях и на линии при обесточенном контактном рельсе (Рис. 3).

Схема электровоза содержала тиристорный импульсный преобразователь, обеспечивавший 4 режима работы его тягового привода:

- фазово-импульсная модуляция для низкой скорости движения в тяге (до 5 км/ч);
- широтно- импульсное регулирование;
- классическая рекуперация на аккумуляторную батарею с независимым возбуждением ТЭД, на скоростях выше 25 км/ч;
- импульсная рекуперация от скорости 25 км/ч и ниже до скорости 1–2 км/ч.



Рис. 3. Контактно – аккумуляторный электровоз Эка-07Т с тиристорным импульсным преобразователем и рекуперативным торможением, созданный на основе вагона «Д»

Fig. 3. Contact–battery electric locomotiveЭка-07 Twith a thyristor pulse converter and regenerative braking created on the basis of the “D” vehicle

На участках с контактным рельсом под напряжением тяга осуществлялась от него, а рекуперация всегда – на аккумуляторную батарею. Кроме экономии энергии, электровоз Эка-07Т имел и другое положительное качество: он практически не нуждался в простоях для заряда батареи (простой снижался в 4–5 раз).

Электровоз обладал запасом хода более 30 км с прицепной нагрузкой 60 т, мог двигаться по уклону 600/00 с длительной скоростью 12 км/ч. По аналогичному принципу был создан ряд других, более новых электровозов (ВЭКА и проч.)

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ В ОБЛАСТИ ЛЕГКОРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА С УАХ

Легкорельсовый транспорт (ЛРТ) без использования контактной сети, примером которого является трамвай с увеличенным автономным ходом (УАХ), представляет собой инновационное решение для улучшения транспортной доступности городов и снижения автомобильного трафика. Преимущества ЛРТ, такие как: высокая проходимость, низкая стоимость эксплуатации, экологичность и комфорт, делают его привлекательным вариантом для развития городской инфраструктуры. В этом случае для увеличения автономного хода также используются суперконденсаторы и аккумуляторные батареи, что позволяет создать эффективную и экологически чистую систему городского электрического транспорта, уменьшить протяженность контактной сети обеспечить более гибкое движение по городским маршрутам. Кардинальным решением является полный отказ от контактной сети.

В Российской Федерации производством трамваев с САХ (трамваи «Витязь») с 2020 года занимаются ООО «ПК Транспортные системы», с 2023 года компания Уралтрансмаш (трамвай «Достоевский») и с 2021 года Усть-Катавский вагоностроительный завод. В настоящее время различные модификации этих трамваев (Табл. 1) успешно эксплуатируются в городах Москва, Санкт-Петербург, Таганрог и Челябинск.

В 2007 году в г. Севилье запустили трамвайный вагон, который проходит конечную остановку без контактной сети (Рис. 4). При проезде участка (без контактной сети) конечной остановки Archivode Indias пантографный токоприемник трамвайного вагона опускается. Когда вагон остановился, пантограф поднимается и несколько минут ионисторы заряжаются. Во время движения по другим участкам,

Таблица 1. Технические характеристики трамвайных вагонов с системой автономного хода**Table 1.** Technical characteristics of tram cars with an autonomous running system

Параметр	Модель			
	71-923М	71-931М	71-431Р	71-628-02
Длина, мм	19405	27500	26950	16450
Ширина, мм	2500 ± 50	2500	2500+50	2500+50
Высота от уровня головки рельса, м	3,7	3,5	3,8	3,9
Масса тары, кг	26500	37000	41900	24000
Пассажировместимость, чел.	138	185	200	165
Количество мест для сиденья, шт.	45/49	60	50	42
Скорость конструкционная, км/ч	75	75	75	75
Мощность ТЭД, кВт	4×72	6×72	6×62	4×62
Накопитель электрической энергии	Аккумуляторная батарея	Аккумуляторная батарея	Аккумуляторная батарея	Суперконденсатор + АБ
Емкость и количество аккумуляторных батарей, шт×А×ч	4×160	8×160	2×160	2×160
Автономный ход (протяженность), не менее, м	500	1000	300 – 3000	300 – 3000

**Рис. 4.** Трамвайный вагон модели Urbos 3**Fig. 4.** Tramvehicle Urbos 3

снабженным контактной сетью, ионисторы заряжаются от последней через пантографный токоприемник [3].

Система статичной наземной подзарядки (SRS), разработанная компанией Alstom, позволяет заменить традиционную КС и пантографы, обеспечивая подзарядку транспортных средств во время их остановок. Благодаря этой системе процесс подзарядки занимает менее двадцати секунд.

Также важно отметить, что около 30% электроэнергии, необходимой для работы трамвайного вагона, вырабатывается во время его торможения. Это эффективное использование энергии и важный шаг в сторону увеличения энергоэффективности городского электротранспорта.

Сейчас имеется участок маршрута, связывающий порт с аэропортом Ницца-Лазурный берег, общая протяженность маршрута – 11,3 км, время в пути составляет 26 минут. В целом, разработка и внедрение системы от Alstom представляют собой важный шаг в развитии инновационного городского электрического транспорта.

В провинции Хунань запустили в 2017 году трамвай ART, работающий без контактной сети (Рис. 5). Данный трамвай произведен локомотивостроительной компанией города Чжучжоу, которая входит в состав корпорации CRRC. Система электропитания САХ данного трамвая содержит литий-титанатную аккумуляторную батарею. Электроэнергия, полученная при 30-секундной зарядке во время остановки, обеспечивает 5 км хода трамвая. При полном заряде аккумуляторной батареи запас автономного хода такого трамвайного вагона составляет 17 км.



Рис. 5. Трамвайный вагон ART

Fig. 5. Tram vehicle ART

Основные технические характеристики трамвайных вагонов с УАХ представлены в Табл. 2.

Таблица 2. Основные технические характеристики трамвайных вагонов

Table 2. Main technical characteristics of tram cars

Характеристики	Трамвайный вагон Urbos 3	Трамвайный вагон ART
Применение	Испания	Китай
Производитель (компания)	CAF	CRRC Zhuzhou Locomotive Co
Вместимость, чел	250	300
Длина вагона, мм	42 856	31640
Ширина, м	2,65	2,65
Высота, м	3,4	3,4
Максимальная скорость, км/ч	70	70
Вес, тонн	56	40
Вид движения	Контактная сеть, ионисторы	Контактная сеть, литий-титанатная батарея

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БОРТОВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Ключевым элементом системы автономного хода является бортовой накопитель электрической энергии. На сегодняшний момент времени наиболее апробировано использование в качестве накопителей аккумуляторных батарей различного типа, основные характеристики которых сведены в Табл. 3.

При выборе ТАБ для электрического транспортного средства важно учитывать все эти характеристики, чтобы обеспечить оптимальную производительность и долговечность системы питания [4].

Наиболее распространенным типом аккумуляторов для электрических транспортных средств являются литий-железо-фосфатные (LiFePO₄) аккумуляторные батареи. Их характеризует: 1) высокая безопасность, т.к. они менее склонны к перегреву и воспламенению, чем другие типы литий-ионных аккумуляторов; 2) долговечность (они имеют высокий цикл прочности, т.е. они могут быть заряжены и разряжены многократно без значительной потери емкости); 3) стабильное напряжение на протяжении всего цикла разрядки. Однако, им свойственны некоторые

Таблица 3. Основные характеристики аккумуляторных батарей**Table 3.** Main characteristics of storage batteries

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	заряда – 320, разряда – 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 (антифриз)
Пробег в режиме автономного хода при номинальной нагрузке, км	7,5–10	не менее 7,5	
Время зарядки, мин	50		
Срок службы, лет	8		
Стоимость ТАБ, млн. руб.	6,5	6	8
Масса ТАБ, кг	320	650	342
Удельная энергия, Вт×ч/кг	150–220	180–200	1400
Достоинства АБ (аккумуляторных батарей)	– высокое напряжение на выходе ТАБ; – широкий диапазон рабочей температуры без дополнительных систем; – низкая масса	– низкая цена; – высокая емкость	– короткая продолжительность цикла зарядки; – надежная и эффективная система терморегулирования
Недостатки АБ	– длительные сроки ожидания отдельных видов комплектующих	– высокая масса системы; – в составе имеется система охлаждения ТАБ, требующая дополнительных затрат; – пластиковый корпус ячеек ТАБ ухудшает теплоотвод	– высокая стоимость АКБ и ремонта при выходе из строя – повышенные требования к квалификации обслуживающего персонала

недостатки, а именно: 1) низкая энергетическая плотность, что ухудшает их массогабаритные показатели; 2) более высокая стоимость по сравнению с другими типами литий-ионных аккумуляторов [5–7].

Литий-железо-фосфатные ТАБ применяются на троллейбусе модели ТРОЛЗА-5265.08 (Рис. 6).

Никель-марганец-кобальтовые (NMC) аккумуляторные батареи являются популярным типом литий-ионных аккумуляторов. Одним из достоинств которых является их высокая энергетическая плотность – они способны хранить большее количество энергии на единицу массы по сравнению с другими типами аккумуляторов. Это делает их привлекательными для использования в различных устройствах, где важна высокая энергоемкость [8, 9].

NMC аккумуляторы могут сохранять свою емкость и производительность на протяжении длительного времени использования. Быстрая скорость зарядки также является преимуществом аккумуляторов. Они способны быстро заряжаться, что делает их удобными для использования в устройствах, требующих быстрой зарядки [10, 11].

Из недостатков можно отметить относительно высокую цену, температурную зависимость параметров аккумуляторов (при низких температурах производительность NMC аккумуляторов снижается), нестабильность с точки зрения безопасности по сравнению с другими типами аккумуляторов [12].

Никель-марганец-кобальтовые батареи (NMC) производства EnerZ применяются на троллейбусе моделей АКСМ-32100D и 5298-0000010-01 Авангард (Рис. 7 и 8).



Рис. 6. Троллейбус модели ТРОЛЗА-5265.08

Fig. 6. The model of the trolleybus TROLLS-5265.08



Рис. 7. Троллейбус модели AKCM-32100D

Fig.7. The model of the trolleybus AKSM-32100D



Рис. 8. Троллейбус модели 5298-0000010-01 Авангард

Fig. 8. The model of the trolleybus 5298-0000010-01Avangard

Третий тип литий-ионных аккумуляторов, на который следует обратить внимание, представляют литий-титанатные (LTO) аккумуляторные батареи. Чьи преимущества составляют: высокая скорость заряда/разряда; широкий диапазон рабочих температур, который включает экстремально низкие и высокие значения; долговечность (способны выдерживать большое количество циклов зарядки и разрядки). К недостаткам можно отнести низкую энергетическую плотность, т.е. плохие массогабаритные показатели, высокую стоимость изготовления [13–16].

Литий-титанатная аккумуляторная батарея (LTO) производства компании Драйв-Электро эксплуатируется на троллейбусе модели ТРОЛЗА-5265.02 (Рис. 9).



Рис. 9. Троллейбус модели ТРОЛЗА-5265.02

Fig. 9. The model of the trolleybus TROLLS-5265.02

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В статье выполнен анализ электрического подвижного состава городского транспорта с автономным ходом, созданного в России и за рубежом в различные периоды времени, рассмотрены основные достоинства и недостатки такого ЭПС.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

В мире имеется опыт успешного использования подвижного состава с автономным ходом, как рельсового, так и безрельсового.

Развитие электрического подвижного состава с автономным ходом, фактически, идет по двум направлениям: системы с чисто аккумуляторным питанием и гибридные схемы с питанием от контактной сети и тяговой аккумуляторной батареи (ранее такие схемы назывались контактно-аккумуляторными).

Широкое внедрение подвижного состава с автономным ходом началось с внедрением литий-ионных аккумуляторных батарей и устройств силовой электроники (преобразователей).

Накопители энергии – тяговые аккумуляторные батареи можно использовать не только для обеспечения движения на участках без контактной сети, но и использовать их для выравнивания нагрузки в системе электроснабжения, приема энергии рекуперации, как данной подвижной единицы, так и других, осуществляющих рекуперативное торможение с отдачей энергии в контактную сеть, и даже аварийное питание контактной сети.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евстафьев А.М. Повышение энергетической эффективности электрического подвижного состава: дисс. д-ра техн. наук. СПб, 2018. EDN: ZCZMUV
2. Шаряков В.А., Шарякова О.Л., Шаряков К.В., Лебедева В.А. Построение системы увеличенного автономного хода с ограничением потребляемого тока из контактной сети // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. Вып. 4. С. 146–157. EDN: DUPIXI doi: 10.20295/2223-9987-2023-4-146-157
3. Парфенов С.И. Троллейбус с автономным ходом // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 3-4. С. 40–41. EDN: PBZHYR
4. Metrocentro: Севильский трамвай [internet] Дата обращения: 13.07.2024. Режим доступа: <https://mikhail.krivyy.com/2016/04/10/sevilla-metrocentro/>
5. Иванов С.Н., Ким К.К., Приходченко О.В., Просолович А.А. Теоретические основы математического моделирования процессов преобразования мощности в совмещенных энергетических устройствах // Ученые записки КнАГТУ. 2020. № I-1(41). С.37–44. EDN: AKBSNQ
6. Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007.
7. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения. ФИЗМАТЛИТ, 2015.
8. Bins K.J., Lawrenson P. Analysis and computation of electric and magnetic problems. Oxford: Pergamon Press, 1963.
9. Flankl M., Wellerdieck T., Tüysüz A., Kolar J.W. Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation // IET Electric Power Applications. 2017. Vol. 12, N. 3. P. 357–364. doi:10.1049/iet-epa.2017.0480
10. Chin J.C., Gray J.S., Jones S.M., Berton J.J. Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger Pod. In: 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 5–9 January 2015. Kissimmee, Florida. Kissimmee, 2015. doi:10.2514/6.2015-1587
11. Janzen R. Trans Pod Ultra-High-Speed Tube Transportation: Dynamics of Vehicles and Infrastructure // Procedia Engineering. 2017. Vol. 199. P. 8–17. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.142
12. Beach A.E. The Pneumatic Tunnel Under Broadway. NY // Scientific American. 1870. Vol. 22, N. 10. P. 154–156. doi: 10.1038/scientificamerican03051870-154

13. Oettershagen P. Perpetual flight with a small solar-powered UAV: Flight results, performance analysis and model validation. In: 2016 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT. IEEE, 2016. doi: 10.1109/AERO.2016.7500855
14. Evstaf'ev A.M., Nikitin V.V., Telichenko S.A. Energy Converters for Hybrid Traction Power Systems Used in Electric Transport // Russ. Electr. Engin. 2020. Vol. 91. P. 77–81. doi: 10.3103/S1068371220020042
15. Nikitin V.V., Sychugov A.N., Rolle I.A., et al. Calculations of the Parameters and Simulation of the Operation of Nonlinear Surge Arresters for AC Rolling Stock // Russ. Electr. Engin. 2020. Vol. 91. P. 87–92. doi: 10.3103/S1068371220020078
16. Valinsky O.S., Evstafev A.M., Nikitin V.V. The Effectiveness of Energy Exchange Processes in Traction Electric Drives with Onboard Capacitive Energy Storages // Russ. Electr. Engin. 2018. Vol. 89. P. 566–570. doi: 10.3103/S1068371218100103

REFERENCES

1. Evstafev AM. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti elektricheskogo podvizhnogo sostava: [dissertation]. St. Petersburg; 2018. (In Russ.) EDN: ZCZMUV
2. Sharyakov VA, Sharyakova OL, Sharyakov KV, Lebedeva VA. Building a system of increased autonomous running with a limitation of current consumption from the contact network. *Bulletin of the results of scientific research*. 2023;(4):146–157. (In Russ.) EDN: DUIXI doi: 10.20295/2223-9987-2023-4-146-157
3. Parfenov SI. Trolleybus s avtonomnym hodom. *Transport of the Russian Federation*. 2012;3-4:40–41. (In Russ.) EDN: PBZHYR
4. Metrocentro: Seville tram [internet] Accessed: 13.07.2024. Available from: <https://mikhail.krivyiy.com/2016/04/10/sevilla-metrocentro/>
5. Ivanov SN, Kim KK, Prikhodchenko OV, Prosolovich AA. Theoretical foundations of mathematical modeling of power conversion processes in combined energy devices. *Scientific notes of KnAGTU*. 2020;I-1(41):37–44 (In Russ.) EDN: AKBSNQ
6. Kim KK. *Sistemy elektrodvizheniya s ispol'zovaniem magnitnogo podvesa i sverhprovodimosti*. Moscow: GOU “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zhelezнодорожном транспорте”; 2007. (In Russ.)
7. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnitolevitacionnyj transport: nauchnye problem tekhnicheskie resheniya*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. (In Russ.)
8. Bins KJ, Lawrenson P. *Analysis and computation of electric and magnetic problems*. Oxford: Pergamon Press; 1963.
9. Flankl M, Wellerdieck T, Tüysüz A, Kolar JW. Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation. *IET Electric Power Applications*. 2017;12(3):357–364. doi:10.1049/iet-epa.2017.0480
10. Chin JC, Gray JS, Jones SM, BertonJJ. Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger Pod. In: *56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. 5–9 January 2015. Kissimmee, Florida. Kissimmee; 2015. doi:10.2514/6.2015-1587
11. Janzen R. Trans Pod Ultra-High-Speed Tube Transportation: Dynamics of Vehicles and Infrastructure. *Procedia Engineering*. 2017;199:8–17. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.142

12. Beach AE. The Pneumatic Tunnel Under Broadway. NY. *Scientific American*. 1870;22(10):154–156. doi: 10.1038/scientificamerican03051870-154
13. Oettershagen P. Perpetual flight with a small solar-powered UAV: Flight results, performance analysis and model validation. In: *2016 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT*. IEEE; 2016. doi: 10.1109/AERO.2016.7500855
14. Evstaf'ev AM, Nikitin VV, Telichenko SA. Energy Converters for Hybrid Traction Power Systems Used in Electric Transport. *Russ. Electr. Engin.* 2020;91:77–81. doi: 10.3103/S1068371220020042
15. Nikitin VV, Sychugov AN, Rolle IA, et al. Calculations of the Parameters and Simulation of the Operation of Nonlinear Surge Arresters for AC Rolling Stock. *Russ. Electr. Engin.* 2020;91:87–92. doi: 10.3103/S1068371220020078
16. Valinsky OS, Evstafev AM, Nikitin VV. The Effectiveness of Energy Exchange Processes in Traction Electric Drives with Onboard Capacitive Energy Storages. *Russ. Electr. Engin.* 2018;89:566–570. doi: 10.3103/S1068371218100103

Сведения об авторах:

Быльцева Василиса Дмитриевна, аспирант;

eLibrary SPIN: 1381-6240; ORCID: 0009-0004-4137-6933;

E-mail: Vasilisa7887@bk.ru

Изварин Михаил Юльевич, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 7753-5243; ORCID: 0009-0002-5638-3867;

E-mail: misha3568723@yandex.ru

Ким Константин Константинович, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;

E-mail: kimkk@inbox.ru

Information about the authors:

Vasilisa D. Byltseva, PhD student;

eLibrary SPIN: 1381-6240; ORCID: 0009-0004-4137-6933;

E-mail: Vasilisa7887@bk.ru

Mikhail Y. Izvarin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 7753-5243; ORCID: 0009-0002-5638-3867;

E-mail: misha3568723@yandex.ru

Konstantin K. Kim, Doctor of Technical Sciences, Professor;

eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;

E-mail: kimkk@inbox.ru