

Шевлюгин Валерий Максимович

Студент, Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ))

SHEVLYUGIN VALERY MAKSIMOVICH

Student, Russian University of Transport (RUT (MIIT))

АНАЛИЗ НЭ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ПОДХОДЯЩЕГО В ИСПОЛЬЗОВАНИИ НА ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА

Технология накопителей энергии очень важна, востребована и может быть очень полезна для энергосистемы. Они позволяют сохранять и использовать электроэнергию, необходимую для работы подземных железнодорожных систем. Массовое применение накопителей энергии в метро начало развиваться в начале 2000-х годов, хотя отдельные эксперименты и разработки в этой области проводились ранее. В настоящее время использование и установка накопителей энергии в системах метро становятся все более распространенными, особенно в крупных городах, стремящихся к повышению энергоэффективности. В статье представлены анализ характеристик и примеры использования НЭ на ТП в России.

Energy storage technology is very important, in demand and can be very useful for the energy system. They allow you to save and use the electricity needed for the operation of underground railway systems. The mass use of energy storage devices in the subway began to develop in the early 2000s, although some experiments and developments in this area were carried out earlier. Currently, the use and installation of energy storage devices in metro systems is becoming more common, especially in large cities seeking to improve energy efficiency. The article presents an analysis of the characteristics and examples of the use of NE on TP in Russia.

Ключевые слова: накопители энергии, энергия, батареи, метрополитен, системы накопления энергии, сверхпроводники.

Keywords: energy storage, energy, batteries, underground, energy storage systems, superconductors.

В московском метро используются различные виды накопителей энергии для обеспечения надежности и эффективности работы системы. [1,55] Основными из них являются:

1. Аккумуляторные батареи
2. Суперконденсаторы
3. Кинетические накопители энергии
4. Гибридные системы накопления энергии
5. Сверхпроводниковые накопители энергии

Аккумуляторные батареи:

- 1) Свинцово-кислотные аккумуляторы

В основном существуют два типа технологий свинцово кислотных АКБ – AGM и GEL. Разница между ними заключается в наличии у AGM типа материала-сепаратора на основе стекловолокна между электродами, в то время как в технологии GEL используется электролит в гелеобразном, желеобразном состоянии (на основе двуокиси кремния (SiO₂)).

Преимуществами этих типов АКБ являются:

- более герметичные, прочные и устойчивые к вибрациям относительно обычных кислотных
- более безопасные
- большая отдача тока
- имеют достойный срок службы

Недостатками этого типа АКБ являются:

- Наличие токсичных веществ.
- Дольше заряжаются (но и дольше разряжаются)
- Есть ограничения по температуре

- Чувствительность к полному разряду.
- Дополнительные требования к перевозке и установке АКБ с жидким электролитом.

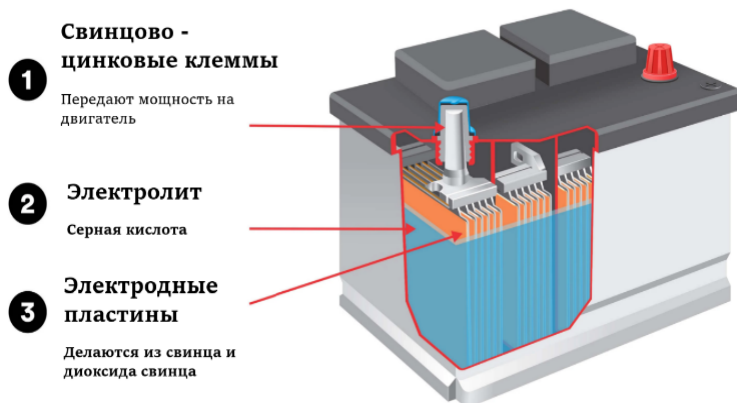


Рис.1. Устройство свинцово-кислотные батареи

Стоимость AGM аккумуляторов ниже, чем у гелевых, но накопители GEL имеют большее количество циклов перезаряда (примерно 550-600 циклов= до 7-10 лет, в то время как у AGM 200 циклов= до 5-8 лет). Удельная энергоёмкость составляет 30–50 Вт·ч/кг.

2) Никель-кадмиевые аккумуляторы

В основе действия этого типа аккумуляторов лежит химическая реакция гидроксида никеля, кадмия и воды. В этих аккумуляторах в качестве катода используется оксид никеля в заряженном состоянии (NiOOH) и гидроксид никеля в разряженном (Ni(OH)_2), а анодом является кадмий (Cd) и гидроксид кадмия (Cd(OH)_2) в заряженном и разряженном состоянии соответственно. Преимущества этих АКБ:

- Быстрая зарядка
- Широкий температурный диапазон работы (от -40°C до 60°C)
- Количество циклов полного заряда-разряда более 1000

- Низкая цена относительно других АКБ

Недостатки:

- Высокий показатель саморазряда (5-8%)

- Эффект памяти

- Использование токсичных материалов и сложности утилизации

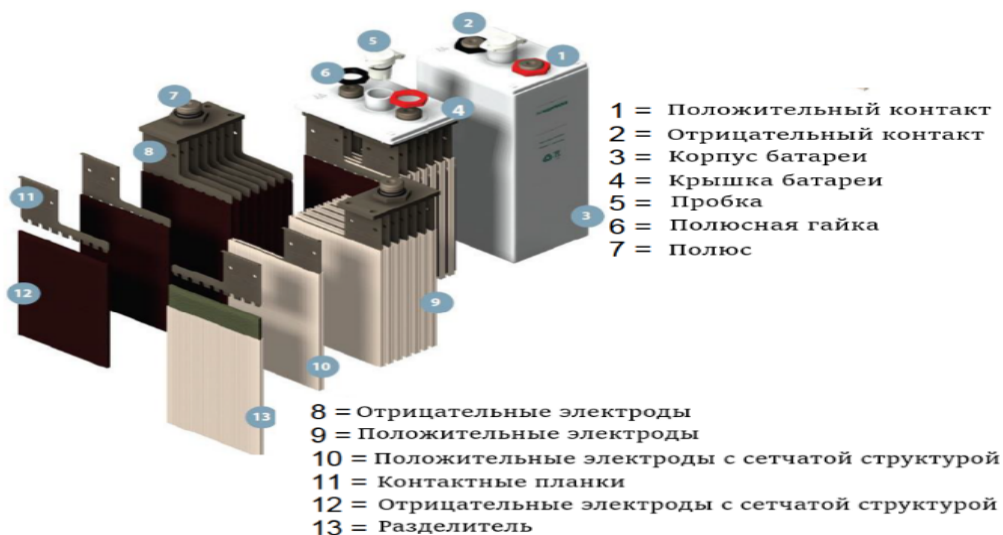


Рис.2. Устройство никель-кадмиевая АКБ

Также никель-кадмиевые аккумуляторы имеют более высокую удельную энергоёмкость, в сравнении со свинцово-кислотными аккумуляторами до 80 Вт*ч/кг. Количество циклов заряда-разряда 1500-4500 (срок службы примерно 7-20 лет).

3) Натриевые аккумуляторы

Натриевые накопители энергии работают по принципу перемещения ионов натрия между анодом и катодом во время зарядки и разрядки. Обычно используются такие материалы, как натриевая сульфидная или натриевая никель-оксидная система. При зарядке ионы натрия движутся к аноду, где они

захватываются и хранятся, а во время разрядки они возвращаются к катоду, высвобождая при этом энергию.

Преимущества натриевых накопителей:

- Доступность (натрий более распространен и дешевле по сравнению, например с популярным в этой сфере литием).
- Экологичность (легче утилизировать и обрабатывать)
- Долговечность
- Термальная стабильность

Недостатки натриевых накопителей:

- Низкая плотность энергии (натриевые батареи имеют меньшую плотность энергии по сравнению с литий-ионными).
- Технология еще находится на стадии разработки.
- Может потребоваться больше материала (относительного того же литий-иона).
- Высокий саморазряд (10-15%)

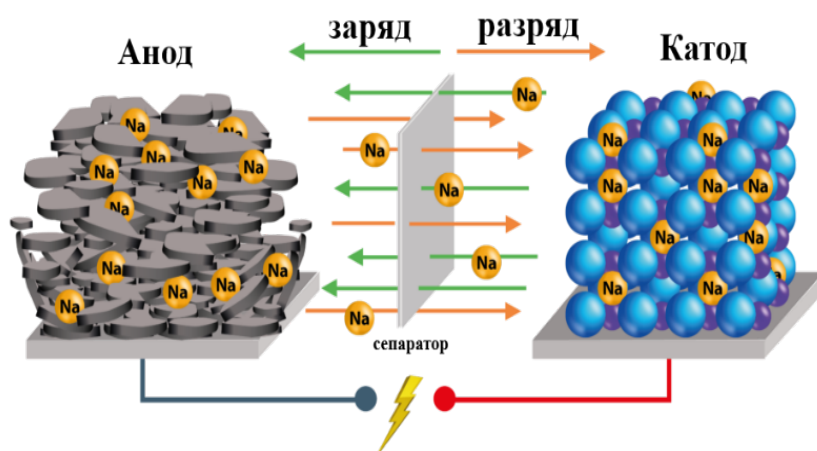


Рис.3. Устройство аккумулятора на основе натрия

Натриевые батареи обычно имеют срок службы в диапазоне от 2000 до 5000 циклов. Это зависит от конкретной технологии и условий эксплуатации = сроку службы 10–20 лет. Удельная энергоёмкость составляет 150–240 Вт·ч/кг.

4) Литий-ионные аккумуляторы

Принцип действия этих накопителей основан на движении ионов лития. Ионы лития движутся от положительного электрода к отрицательному в процессе зарядки и возвращаются обратно в процессе разрядки. В зависимости от химических материалов в электродах были разработаны разные типы литий-ионных АКБ: оксид лития-кобальта, оксид лития-марганца, оксид литий-никель-марганца-кобальта, оксид литий-никель-кобальт-алюминий, литий-фосфатные и литий-титанатные батареи.

Преимущества литий-ионных накопителей:

- Обладают высокой плотностью энергии.
- Долговечность.
- Низкий саморазряд (менее 1%)
- Отсутствие эффекта памяти.
- Работа при широком диапазоне температур
- Очень высокий показатель КПД заряда-разряда

Недостатки:

- Стоимость (литий-ионные батареи могут быть дорогими в производстве по сравнению с другими типами АКБ).
- Безопасность (могут перегреваться, что может привести к возгоранию или взрыву).
- Чувствительность к температуре.
- Экологические проблемы (сложнее утилизировать и обрабатывать).

- Потеря емкости со временем.

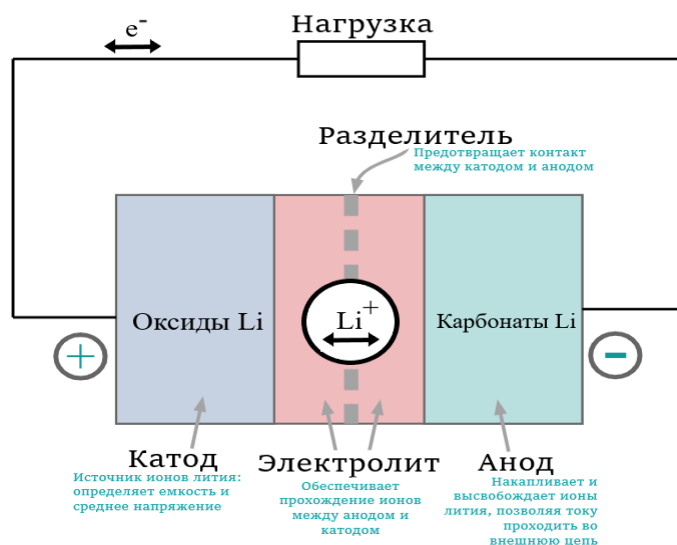


Рис.4. Структура литий-ионного аккумулятора

Средняя удельная энергоемкость этого типа АКБ 150–250 Вт·ч/кг. Количество циклов заряда/разряда составляет примерно 1000–35 000 (срок службы 8–25 лет).

5) Проточные окислительно-восстановительные батареи

Эти электрохимические устройства вырабатывают электрическую энергию используя два жидких активных материала, которые разделены ионообменной мембраной. По обе ее стороны проходят реакции восстановления и окисления при перекачке жидкости. Этот тип АКБ является самым распространенным и дешевым среди всех проточных батарей.

Преимущества:

- Практически отсутствует явление саморазряда (т.к. электролиты хранятся в отдельных резервуарах)

- Стоимость

- Длительный срок службы
- Хорошая масштабируемость

Недостатки:

- Большая чувствительность и зависимость от температуры
- Невыгодные массогабаритных характеристики
- Низкая плотность энергии
- Слабая мощность

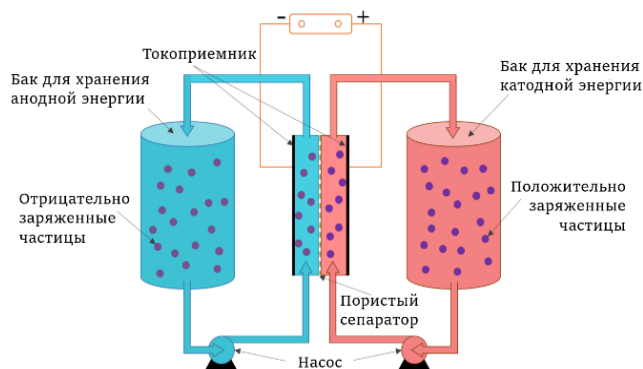


Рис.5. Структура проточного окислительно-восстановительного аккумулятора

Удельная энергоёмкость этих накопителей энергии составляет 10–30 Вт·ч/кг. Количество циклов приблизительно >16 000 (срок службы составит 10-20 лет).

Суперконденсаторы

Представляют собой конденсатор с органическим или неорганическим электролитом, в котором обкладки это двойной электрический слой на границе электрода и электролита. Чтобы повысить площадь этого слоя применяют электроды с высокоразвитой поверхностью (на основе пористых материалов - активированного угля и др.), за счет чего удается достичь невозможных для

обычных конденсаторов значений емкости в сотни и даже тысячи фарад при тех же массах и габаритах. В качестве сепаратора используют мембрану, которая сохраняет функцию ионного обмена. Мембраны бывают полимерные, целлюлозно-бумажные и из стекловолокна.

Преимущества суперконденсаторов:

- Быстрая зарядка и разрядка
- Более длительный срок службы по сравнению с другими АКБ
- Высокая мощность
- Низкие потери энергии
- Высокая цикличность
- Работа в экстремальных температурных условиях

Недостатки:

- Малая энергоемкость
- Скорость саморазряда (до 1-10%)
- Стоимость
- Меньшая плотность энергии

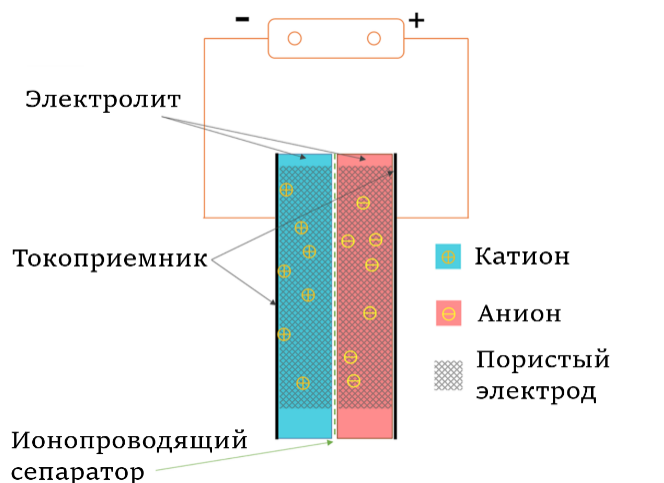


Рис.6. Структура суперконденсатора

Удельная энергоёмкость суперконденсаторов составляет 5–15 Вт·ч/кг. Количество циклов составляет >500 000, из чего можно сделать вывод что проработать они смогут от 10 до 30 лет.

Кинетические накопители энергии

Принцип действия этих устройств заключается в накоплении электрической энергии в виде механической энергии вращения маховика (сохранение энергии механически в виде энергии вращения массы). Маховик представляет собой массивное вращающееся колесо, которое используют в качестве инерционного аккумулятора. Благодаря наличию привода (механического или электрического), маховик раскручивается, а во время вращения и происходит запас кинетической энергии. В моменты избытка энергии, маховик запасает её, а во время дефицита – отдаёт, что позволяет выровнять поступление энергии. Маховик может экономить до половины циклов «заряд-разряд» аккумулятора.

Преимущества кинетических накопителей энергии:

- Более высокий КПД по сравнению с другими НЭ
- Долговечность
- Быстродействующая отдача энергии
- Один из самых экологичных видов НЭ
- Выдача больших мощностей при кратковременных пиковых нагрузках
- Отсутствие химических процессов

Недостатки:

- Сложность масштабирования

- Ограниченное время хранения энергии
- Низкая энергетическая плотность

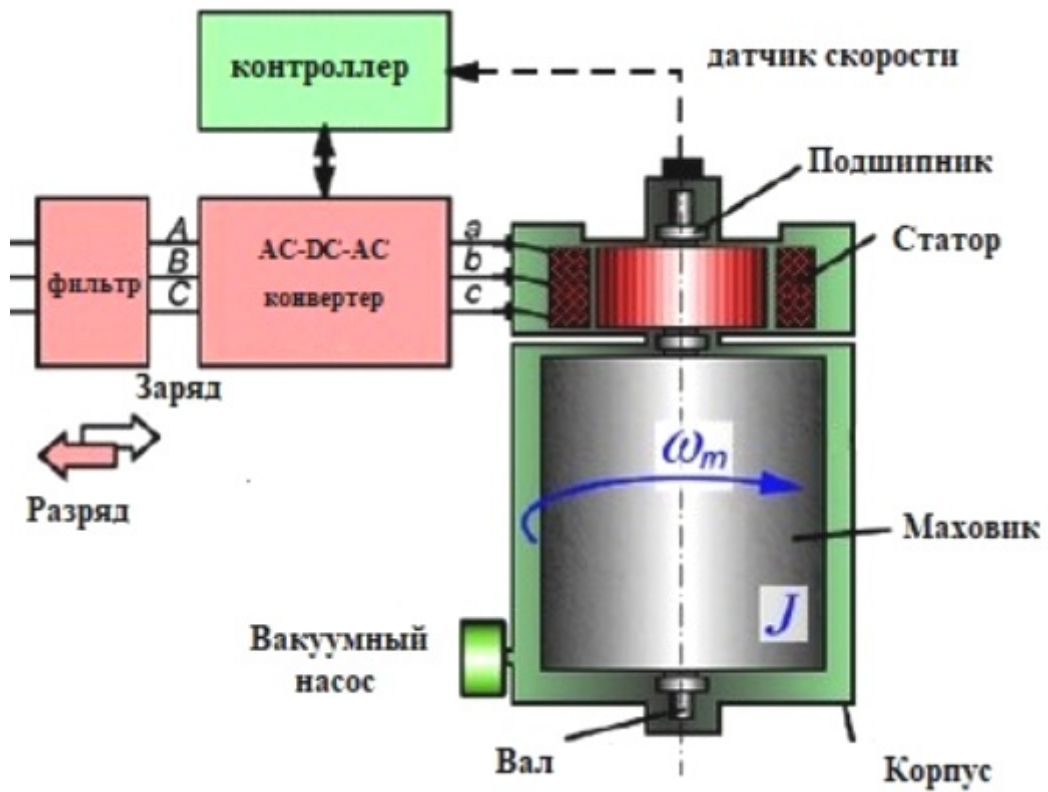


Рис.7. Структура кинетического НЭ с маховиком

Удельная энергоемкость этих типов НЭ составляет от 5 до 150 Вт·ч/кг. Количество циклов заряда-разряда $>100\,000$ (срок службы 20-30 лет).

Сверхпроводниковые накопители энергии

Принцип основан на сверхпроводимости. Проводник охлаждается ниже критической температуры, в следствии чего пропадает его электрическое сопротивление, соответственно нет выделения энергии без сопротивления. Этот тип НЭ может сберегать энергию долгое время в виде энергии магнитного поля, которое создается сверхпроводящим соленоидом. Таким образом, этот ток может течь бесконечно долго без потерь, что делает сверхпроводниковые накопители эффективным способом хранения энергии.

Преимущества:

- Надежность
- Отсутствие химических процессов
- Высокий КПД (90-95%)
- Компактность
- Высокая мощность

Недостатки:

- Потребность в низкотемпературном охлаждении
- Стоимость
- Менее длительный срок хранения энергии по сравнению с другими типами НЭ
- Проблемы производства

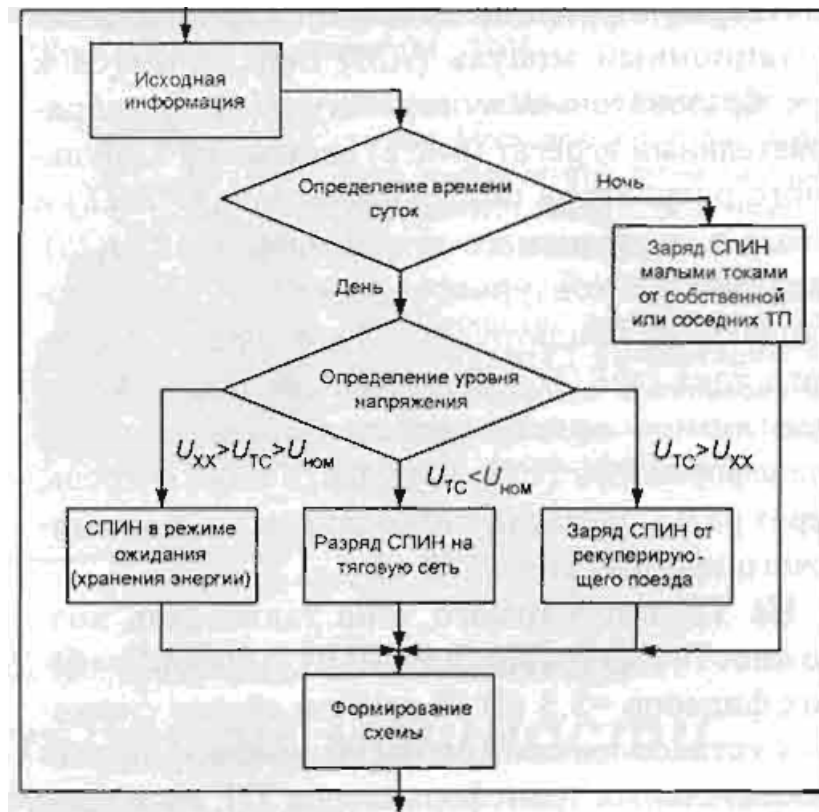


Рис.8. Фрагмент блок схемы алгоритма выбора режима работы СПИН

Энергоемкость этого типа НЭ обычно составляет около 10–100 Вт·ч/кг. Количество циклов заряда разряда в зависимости режимов эксплуатации может достигать до 10^{12} раз из-за чего срок службы этих накопителей может растянуться на несколько десятков лет. [6, с.44; 7, с.550; 8, с.12; 9, с.50; 10, с.130; 11, с.479; 12, с.10]

Гибридные системы накопления энергии

Главная идея гибридной системы накопления энергии заключается в том, что гибридные НЭ объединяют лучшие качества каждого НЭ и минимизируют слабые стороны для обеспечения лучшей производительности. Как правило, представляет собой интеграцию по крайней мере двух типов устройств НЭ: один должен обладать высокой энергоемкостью, а другой высокой входной и выходной мощностью. Можно выделить три основных типа пар (Рис.9.): пассивные параллельные (а), каскадные (б) и активные (в).

Схема подключения гибридных НЭ:

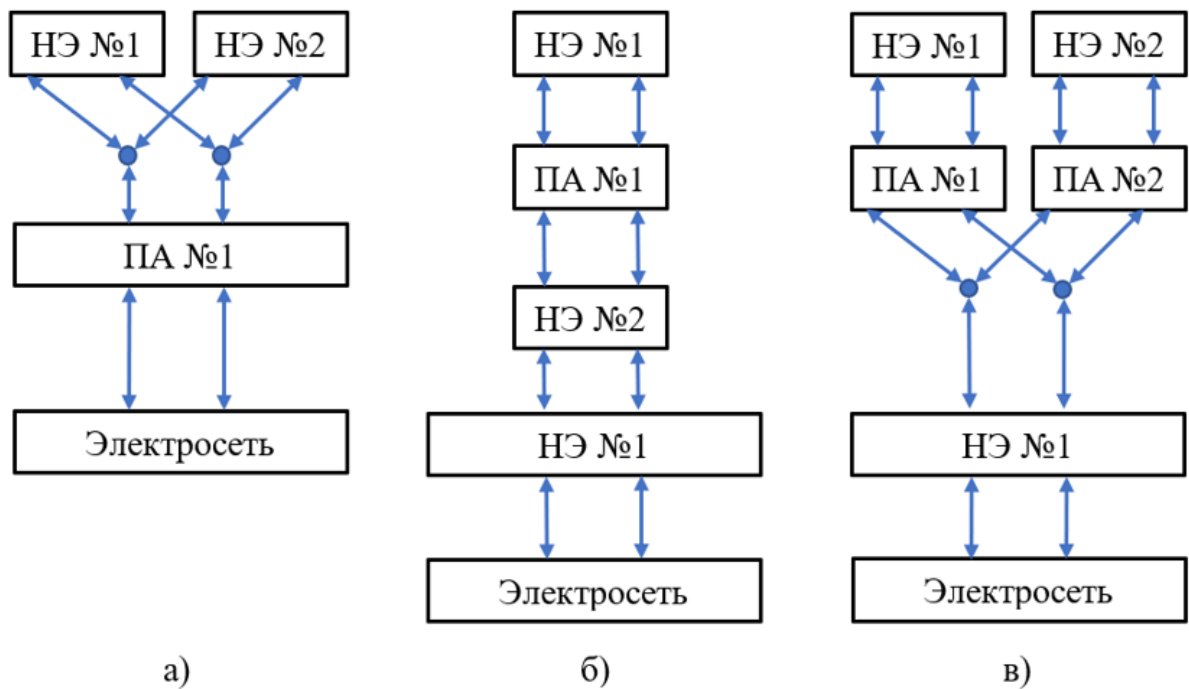


Рис.9. Основные типы пар накопителей энергии

Каскадная конфигурация более эффективна, чем пассивная параллельная, но более дорогостоящая в реализации и использует дополнительный преобразователь между НЭ. В таком случае устройства НЭ не связаны между собой и можно управлять запасами энергии. Но в такой конфигурации мало вариантов управления энергией и есть ограничения масштабируемости. В свою очередь, активная параллельная конфигурация лучше каскадной, благодаря гибкости настройки: каждое устройство НЭ подключено к своему преобразователю мощности. [13, с.29; 14, с.47; 15, с.4;] Значит, каждое устройство НЭ может работать с максимальной эффективностью.

Подводя итоги, можно наглядно рассмотреть главные параметры НЭ, на основе чего выбирать их для эксплуатации на тяговой подстанции метрополитена. Данный рисунок (Рис.10) иллюстрирует сравнение всех типов НЭ по основным характеристикам:

Тип исполнения НЭ	Удельная энергоёмкость (Вт·ч/кг)	Удельная мощность (Вт/кг)	КПД цикла заряд/разряд (%)	Цикличность (Циклы)	Срок службы (Год)	Саморазряд (потеря % заряда за сутки)
Свинцово-кислотные аккумуляторы	30–50	75–300	80–90	200–2000	5–10	0.05–0.3
Никель-кадмиевые аккумуляторы	50–75	150–300	60–83	1500–4500	7–20	5–8
Натриевые аккумуляторы	150–240	150–230	75–90	2000–5000	10–20	15–20
Литий-ионные аккумуляторы	150–250	500–2000	90–98	1000–30 000	8–25	0.1–0.3
Проточные окислительно-восстановительные аккумуляторы	10–30	166	75–80	>16 000	10–20	0–10
Суперконденсаторы компании «ГЭЭМП»	10–15	5000 – 10 000	>93	>1 000 000	10–30	<8
Суперконденсаторы компании «ЭКОНД»	8–12	2349–10 000	>91	>1 000 000	10–20	<10
Суперконденсаторы компании «ЭЛТОН (ТехноКор)»	10–12	1058.8–10 000	>92	>1 000 000	10–20	<10
Кинетические НЭ	5-150	10-1000	70-90	>100 000	20-30	1-5
Сверхпроводниковые НЭ	10-100	10-200	90-95	>1 000 000 000 000	>20	1

Рис.10. Сравнение накопителей энергии

Основываясь на данных из этой таблицы и ориентируясь на среднюю стоимость НЭ из этого перечня, можно сделать вывод, что наиболее подходящий в использовании НЭ на тяговой подстанции метрополитена являются литий-ионные аккумуляторные батареи. [9,120] Они будут самым выгодным и эффективным решением с расчетом на долгую перспективу.

Список литературы

1. Гречишников В.А., Шевлюгин М.В. Эксплуатация накопителя энергии на метрополитене // Мир транспорта. 2013. Т. 11. № 5 (49). С. 54-58.

2. Гречишников В.А., Подаруев А.И., Шевлюгин М.В. Преобразовательный агрегат ёмкостного накопителя энергии для системы тягового электроснабжения метрополитена.// Электротехника. 2011. № 5. С. 17-22.

3. Кацай А.В., Шевлюгин М.В. Экономия энергии в контактной сети электротранспорта при работе стационарного накопителя. Практическая силовая электроника. 2023. № 1 (89). С. 42-52.

4. Кацай А.В., Шевлюгин М.В. Влияние буферных накопителей бортового и стационарного типа на энергопотребление тяговых подстанций в горэлектротранспорте //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 542-560.

5. Кацай А.В., Шевлюгин М.В. Утилизация избыточной рекуперации в контактной сети электротранспорта при зарядке стационарного накопителя. Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 1 (58). С. 10-20.

6. Кацай А.В., Шевлюгин М.В. Структура потоков энергии рекуперации в контактной сети тяговой подстанции с наземным накопителем. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. //Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2023. № 45. С. 48-79.

7. Кацай А.В., Шевлюгин М.В. «АКТИВНАЯ ЗАГРУЗКА И ПОЛЕЗНАЯ УТИЛИЗАЦИЯ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ЭНЕРГИИ БОРТОВЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ В ГОРЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ» //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 7. С. 476-487.

8. Кацай А.В., Шевлюгин М.В. «ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ В ГОРОДСКОМ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ» // Вестник

Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2022. № 43. С. 5-28.

9. Плетнёв Д. С. Бортовой накопитель энергии на электроподвижном составе метрополитена : дис. ... к. т. н. / Российский университет транспорта (МИИТ). – М., 2024. – 176 с.

10. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДЛЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ И ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНОВ /Абрамсон В.М., Минц А.М., Андреев В.В., Гречишников В.А., Клинов В.Ю., Пупынин В.Н., Розанцева С.В., Шевлюгин М.В., Комиссаров Н.Н.// Патент на полезную модель RU 43977 U1, 10.02.2005. Заявка № 2004131295/22 от 27.10.2004.

11. «Оценка эффективности использования стационарных ёмкостных накопителей энергии в метрополитене на основе экспериментальных замеров показателей работы системы тягового электроснабжения» ./ Баранов Л.А., Бродский Ю.А., Гречишников В.А., Подаруев А.И., Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В.//, Электротехника. 2010. № 1. С. 62-65.

12. Стационарная система аккумулирования энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе ёмкостных накопителей энергии. /Бродский Ю.А., Подаруев А.И., Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В.// Электротехника. 2008. № 7. С. 38-41.

13. Опыт пуска электроподвижного состава при помощи "накопительных" тяговых подстанций на Московском метрополитене. /Шевлюгин М.В., Ермоленко Д.В., Стадников А.Н., Голицына А.Е.// Электротехника. 2017. № 11. С. 75-80.

14. Цифровой двойник электроподвижного состава в тяговой сети метрополитена./ Шевлюгин М.В., Королев А.А., Голицына А.Е., Плетнев Д.С. // Электротехника. 2019. № 9. С. 41-46.

15. Цифровое моделирование движения электроподвижного состава 81-775/776/777 "МОСКВА-2020" с учетом рекуперативного торможения на линии Московского метрополитена./ Шевлюгин М.В., Королев А.А., Голицына А.Е., Плетнев Д.С. евлюгин М.В., Плетнев Д.С., Белов М.Н., Минаков З.Е //Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". 2023. № 1. С. 119-129.

16. Шевлюгин М.В. Система накопления энергии на вагоне метро для аварийного выхода поезда из туннеля. //Наука и техника транспорта. 2006. № 3. С. 29-33.

17. Шевлюгин М.В. ЕНЭ на борту метropоезда. //Мир транспорта. 2007. Т. 5. № 1 (17). С. 46-49.

18. Шевлюгин М.В., Голицына А.Е., Стадников А.Н. Опытная эксплуатация накопителей энергии неуправляемого типа на тяговых подстанциях московского метрополитена.// Электропитание. 2019. № 4. С. 51-60.

19. Шевлюгин М.В., Желтов К.С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии //Наука и техника транспорта. 2008. № 1. С. 15-20.

20. Экспериментальное исследование автономного хода электроподвижного состава метрополитена. / Шевлюгин М.В., Желтов К.С., Плетнев Д.С., Глущенко М.Д. //Электротехника. 2021. № 9. С. 19-21