

Энергосберегающие технологии

Курс лекций

Понятие энергосбережения

Энергосбережение-комплекс мер по реализации правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное (рациональное) использование (и экономное расходование) топливно-энергетических ресурсов и на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии (ГОСТ Р 51387-99 «Энергосбережение»).

Три основных направления энергосбережения:

- ▶ полезное использование (утилизация) энергетических потерь;
- ▶ модернизация оборудования с целью уменьшения потерь энергии;
- ▶ интенсивное энергосбережение.



Способы снижения потребления энергии на тягу поездов

1. Энергоэффективный способ ведения поезда
2. Снижение потерь в тяговой сети
3. Применение рекуперативного торможения

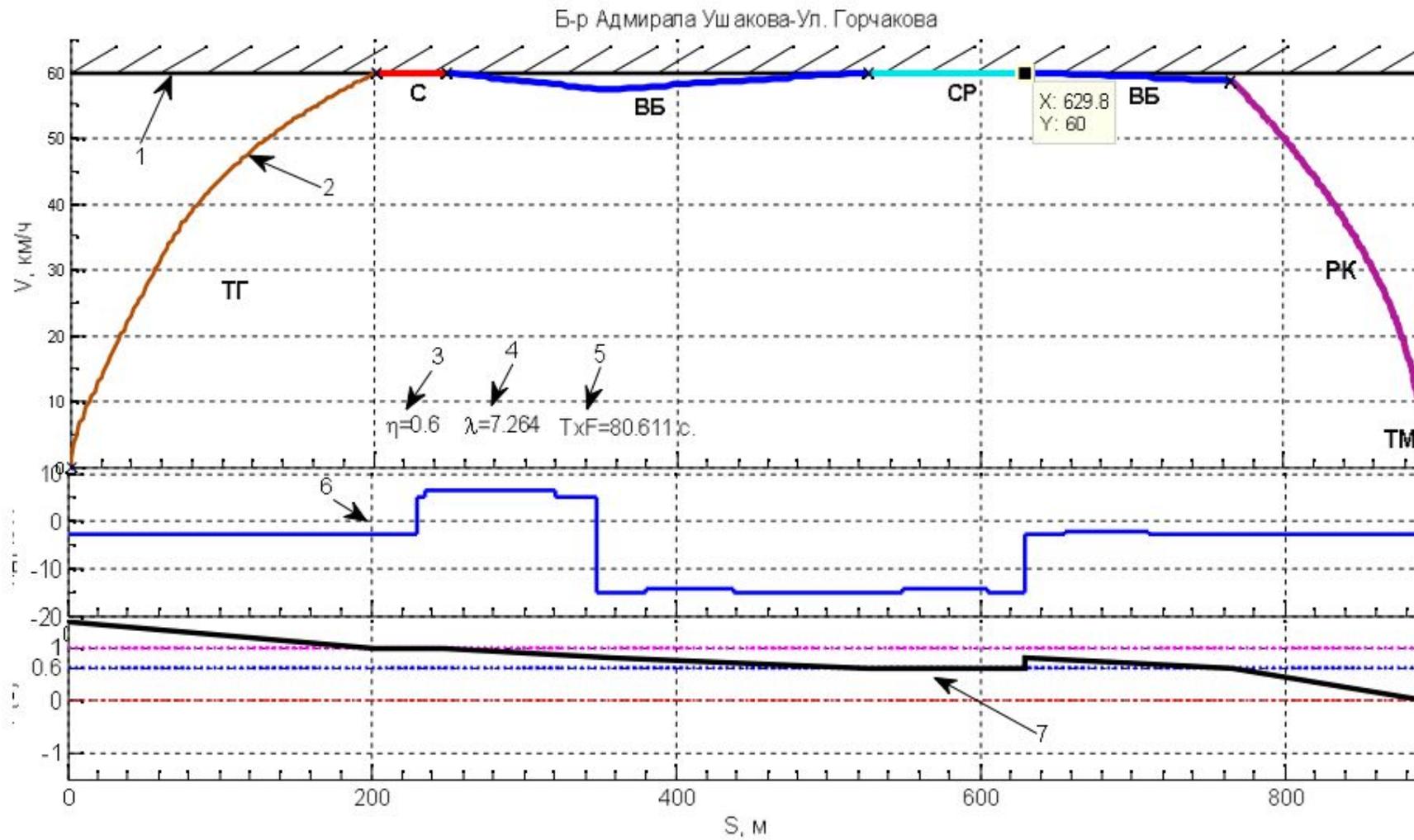
Способы энергоэффективного ведения поезда

Выбор способа управления поездом может диктоваться вопросами энергоэффективности.

Выбор оптимального управления движением поезда является результатом комплексного моделирования процесса движения поезда.

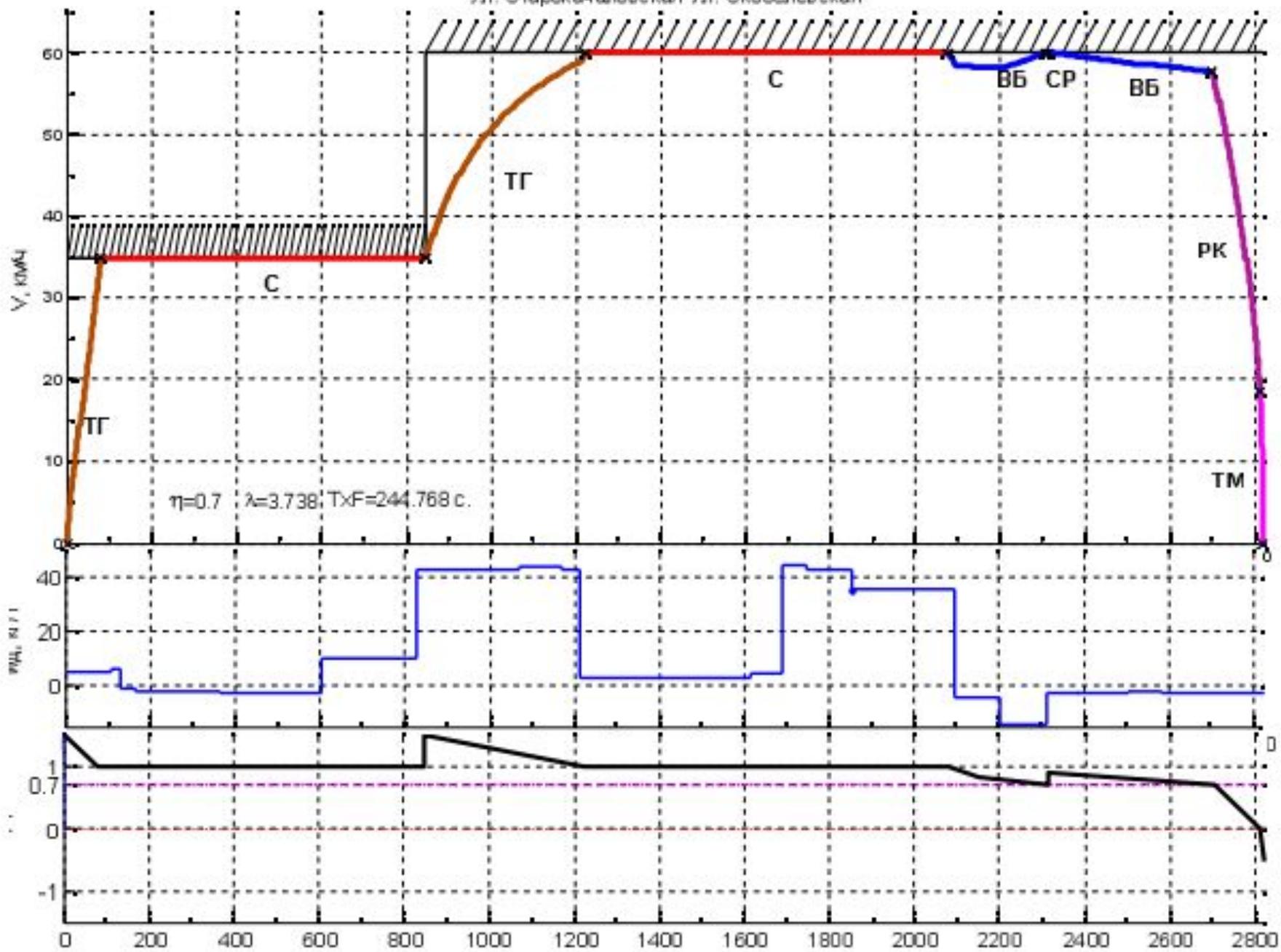
Основными и наиболее важными критериями являются допустимые скорости движения на участке, параметры поезда (масса, характеристики локомотива и т.д.) и профиль пути. Оказывает влияние наличие или отсутствие рекуперативного торможения.

Примеры выбора оптимального управления движением поезда

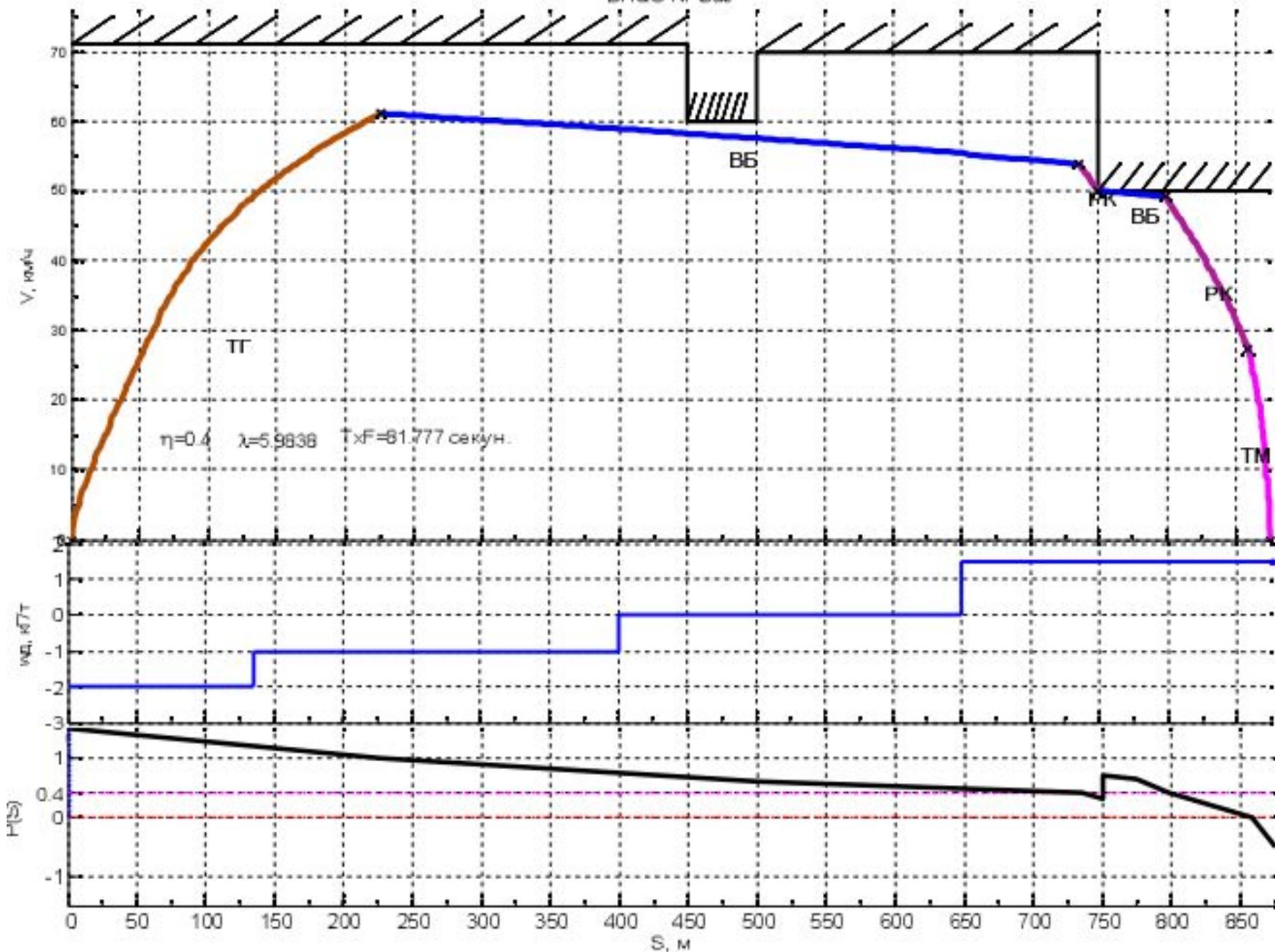


Энергооптимальная траектория движения на перегоне «Б-р Адмирала Ушакова-Ул. Горчакова» Московского метрополитена. Цифрами обозначено: 1 -ограничение скорости; 2 – зависимость скорости движения поезда от пути; 3 – коэффициент возврата электроэнергии в сеть; 4 – значение λ ; 5 время хода; 6 зависимость дополнительного сопротивления движению от пути; 7- зависимость значения функции p от пути.

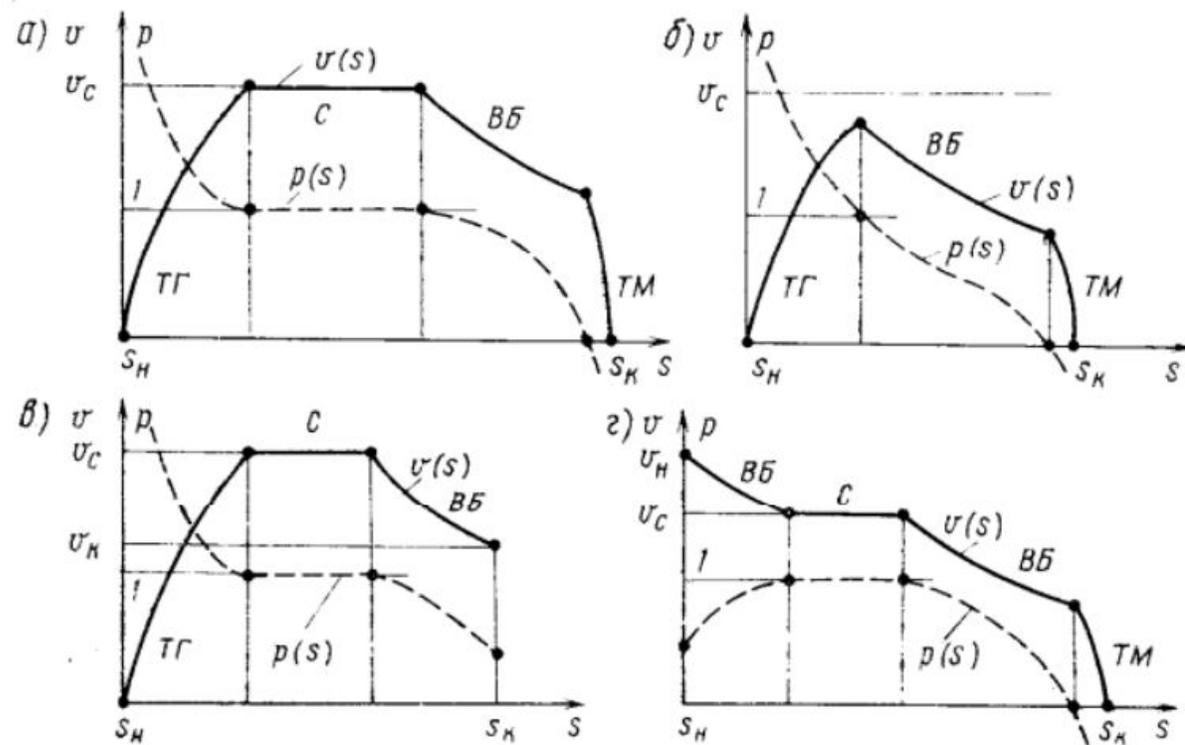
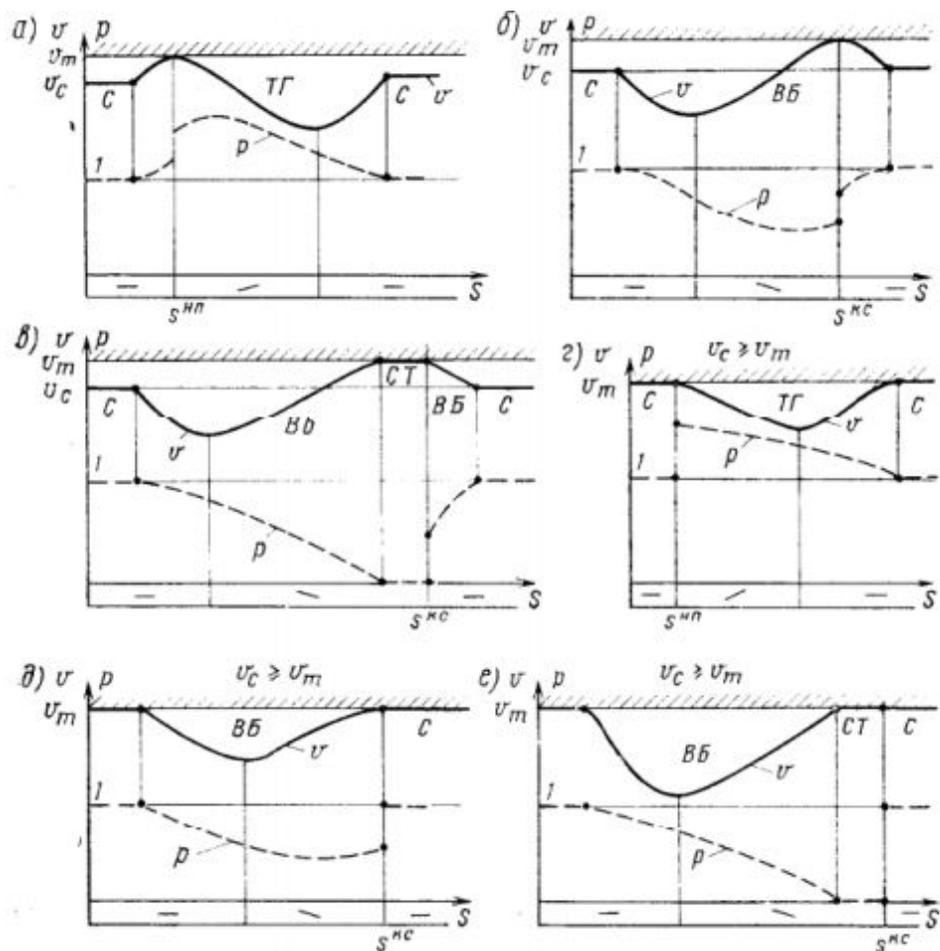
Ул. Старокачаловская-Ул. Скобелевская



DHGG-NPSac



Влияние профиля пути и массы состава на выбор оптимального режима



Снижение потерь в тяговой сети

Потери энергии в тяговой сети происходят из-за нагрева проводника под действием проходящего по нему электрического тока.

Основные способы снижения потерь в тяговой сети:

1. Увеличение сечения контактной сети (Усиление)
2. Изменение схемы питания участка
3. Компенсация реактивной мощности
4. Повышение питающего напряжения
5. Снижение пиковых значений токов в контактной сети

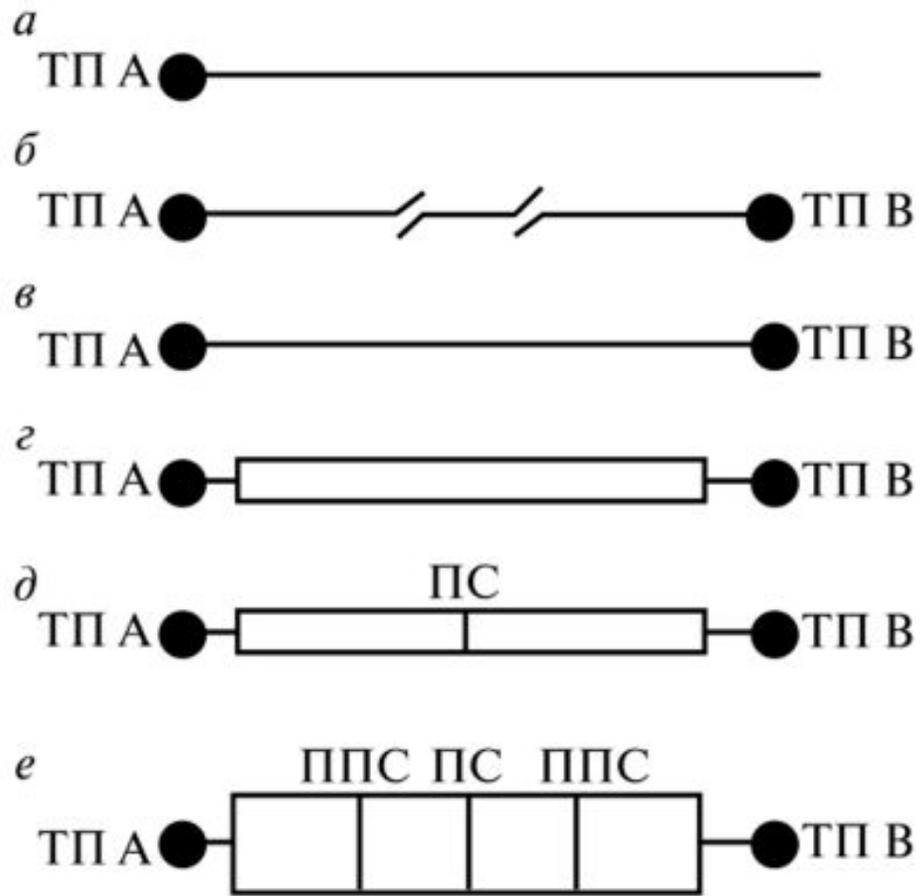
Увеличение сечения контактной сети

- ▶ Увеличивают сечение контактной сети, обычно, на загруженных участках в тех случаях, когда допустимые токи контактной сети могут быть превышены. Однако, помимо увеличения допустимого тока, эта мера также приводит к снижению сопротивления контактной сети, тем самым уменьшая потери.

Уменьшение потерь в контактной сети путём изменения схемы питания.

- ▶ Изменение схемы питания ведёт к изменению токораспределения в контактной сети. Наиболее тяжёлым режимом работы сети обычно является консольное питание какого либо участка. За редким исключением, такой режим возможен только при авариях на одной из подстанций, но даже в таком случае его стараются избегать.
- ▶ Наиболее эффективной схемой питания является параллельная схема питания. При таком подключении питающих линий к контактной сети и расположении пунктов параллельного соединения большую часть времени ток локомотива распределяется между параллельными участками контактной сети, т.о. протекая по вдвое меньшему сопротивлению.
- ▶ Выбор правильной схемы питания в значительной мере влияет на энергоэффективность СТЭ.

Принципиальные схемы питания контактной сети



Принципиальные схемы питания контактной сети: *а* – с односторонним консольным питанием однопутного участка; *б* – с односторонним встречно-консольным питанием однопутного участка; *в* – с двухсторонним питанием однопутного участка; *г* – отдельная схема питания двухпутного участка; *д* – узловая схема питания; *е* – параллельная схема питания; ТП А, ТП В – тяговые подстанции; ПС – пост секционирования; ППС – пункт параллельного соединения

Компенсация реактивной мощности

- ▶ Компенсация реактивной мощности — целенаправленное воздействие на баланс реактивной мощности в узле электроэнергетической системы с целью регулирования напряжения, а в распределительных сетях и с целью снижения потерь электроэнергии. Осуществляется с использованием компенсирующих устройств.

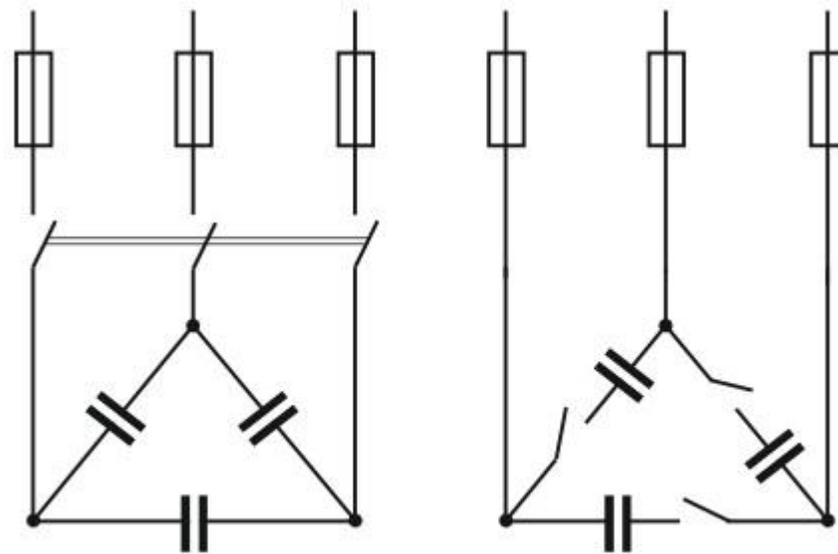
Влияние реактивной мощности на распределительную сеть

Наличие реактивной мощности является паразитирующим фактором, неблагоприятным для сети в целом. В результате этого:

- ▶ увеличиваются расходы на электроэнергию;
- ▶ приходится платить штрафы за снижение качества электроэнергии пониженным коэффициентом мощности
- ▶ возникают дополнительные потери в проводниках вследствие увеличения тока;
- ▶ увеличивается нагрузка на трансформаторы и коммутационную аппаратуру, таким образом, снижается срок их службы
- ▶ увеличивается нагрузка на провода, кабели, увеличивается их сечение;
- ▶ отклоняется напряжение сети от номинала (падение напряжения из-за увеличения реактивной составляющей тока питающей сети).

Устройства компенсации реактивной мощности

На железных дорогах применяются средства продольной ёмкостной компенсации. Под реактивной мощностью в распределительных сетях обычно подразумевается индуктивная мощность, создаваемая обмотками трансформаторов и двигателей, т.к. в общем случае она значительно превалирует над ёмкостной составляющей и нуждается в компенсации.



Типовые схемы включения 3-ф устройства компенсации

Выбор типа компенсации

В зависимости от требований к характеристикам оборудования и сложности управления, КРМ может быть следующих типов:

- ▶ нерегулируемой - путем подключения конденсаторной батареи фиксированной емкости;
- ▶ автоматической - путем включения различного количества ступеней регулирования для подачи требуемой реактивной энергии;
- ▶ динамической - для компенсации быстро изменяющихся нагрузок.

Повышение питающего напряжения

Повышение напряжения в питающей сети приводит к снижению токов нагрузки и значительному уменьшению потерь в тяговой сети.

Обычно, повысить напряжение в тяговой сети можно следующими способами:

- ▶ Повышение напряжения холостого хода (ХХ) на шинах подстанций
- ▶ Уменьшение длины межподстанционной зоны
- ▶ Установка накопителей энергии в середине участка.

Снижение пиковых значений токов в контактной сети

Выравнивание нагрузок в тяговой сети можно осуществить при помощи установки накопителей энергии на ЭПС. Бортовые накопители энергии принимают энергию рекуперативного торможения поезда и, в момент пуска локомотива, принимают часть нагрузки, тем самым снижая ток в контактной сети. Потери во внутренних цепях локомотива значительно ниже потерь в контактной сети, потому такое применение эффективно.

Рекуперативное торможение

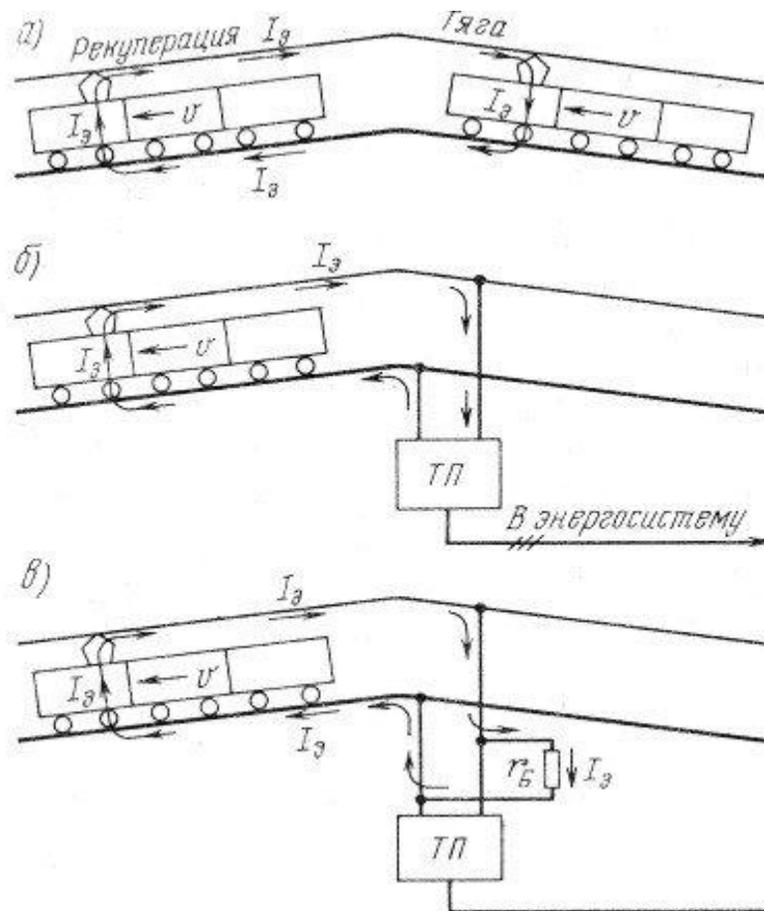
Рекуперативное торможение на железнодорожном транспорте - процесс преобразования кинетической энергии движения поезда в электрическую за счёт перевода электродвигателей в генераторный режим при торможении состава. Рекуперативное торможение используется для поддержания скоростных режимов на спусках и в других моментах, где использование воздушной системы торможения нецелесообразно. Даже до начала применения рекуперации, в вышеназванных случаях применялось реостатное торможение, что заставляло потенциально полезную энергию «греть воздух».

Эффективность рекуперации

Поезда, совершающие большое количество остановок, наиболее эффективно генерируют энергию рекуперации, поскольку часто используют рекуперативное торможение. По разным оценкам, применение рекуперации на подвижном составе пригородного снабжения России на данный момент позволяет экономить около 10-20% энергии, затрачиваемой на тягу, а на зарубежных наземных и подземных видах рельсового электротранспорта – до 30%. Применительно к московскому метрополитену в ходе экспериментальных оценок выявлено, что рекуперируемая энергия может составлять 15-30%.

Техническая реализация рекуперации

1. Межпоездной обмен
2. Накопители энергии на подвижном составе
3. Накопители энергии в тяговой сети
4. Возврат рекуперированной энергии во внешнюю сеть



Межпоездной обмен

Проще всего данный подход описать на классическом примере: поезд А тормозит, а поезд Б – начинает движение. В теории, энергию торможения поезда А можно отдать поезду Б через тяговую сеть, тем самым облегчая его пуск (который, как известно, является наиболее тяжёлым режимом). Тем самым мы достаточно просто решаем две задачи: облегчаем режимы работы преобразовательных агрегатов подстанции, уменьшая их пиковую мощность, и экономим электроэнергию.

Накопители энергии на подвижном составе

Преимущество над другими способами реализации использования энергии рекуперации, заключается в уменьшении суммарных потерь, возникающих при передаче энергии по тяговой сети до приёмника. В данном случае приёмник (аккумуляторная батарея) находится в непосредственной близости от тягового двигателя, на борту подвижного состава. Современное развитие накопителей энергии значительно увеличило их энергоёмкость и упростило их размещение и обслуживание, что и сделало возможным установку их в более трудных условиях без значительных препятствий и угрозы транспортной безопасности.

Накопители энергии в тяговой сети

Развивая идею подпитки пускающихся локомотивов энергией рекуперации через тяговую сеть, мы сталкиваемся с проблемой трудно реализуемой регулировки движения поездов, отвечающей требованиям её выполнения. Однако, если бы мы могли запасти энергию торможения и отдать её при необходимости ближайшему составу, когда бы он ни перешёл в режим тяги, это позволило бы обойти данные ограничения. Установка аккумуляторов в тяговую сеть позволяет достичь этого эффекта без изменения графиков движения поездов.

Возврат рекуперированной энергии во внешнюю сеть

По сути, выработанная энергия перепродаётся другим потребителям, обеспечивая дополнительный доход предприятию за счёт уже купленной у энергокомпании электроэнергии. Логично предположить, что предприятие будет иметь несколько другой статус, когда начнёт являться поставщиком электроэнергии, а значит будет обязано поддерживать определённое ГОСТ качество выдаваемой электроэнергии.

Требует дополнительных инвестиционных и административных ресурсов.

Подходы к рекуперации

Межпоездной обмен

Плюсы:

- + Технически простой способ
- + Не требуется капитальных вложений

Минусы:

- Трудно реализовать подходящий график движения
- Очень низкая эффективность (до 5%)

Возвращение во внешнюю энергосеть

Плюсы:

- + Высокая эффективность
- + Польза для энергосистемы

Минусы:

- Необходимость серьёзных капитальных затрат на замену ВА на ВИА

Примечание:

Не допускается современным законодательством РФ!

Сохранение в накопителях

Плюсы:

- + Позволяет развивать классические подходы
- + Высокая вариативность способов реализации
- + Наибольшая эффективность

Минусы:

- Необходимость серьёзных капитальных и проектных затрат

Способы снижения потребления энергии нетяговыми потребителями

Основные способы снижения потребления энергии в сетях нетяговых потребителей:

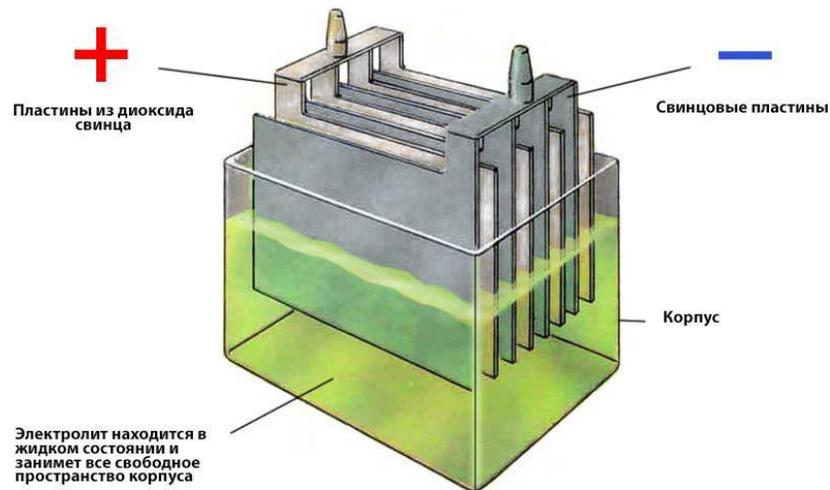
- ▶ Модернизация оборудования
- ▶ Установка накопителей энергии для выравнивания нагрузок
- ▶ Оптимизация режимов потребления

Основные типы современных накопителей энергии

Свинцово-кислотные аккумуляторы

Плюсы:

- ▶ Дешевизна
- ▶ Наличие опыта использования на Московском метрополитене



Минусы:

- Низкая энергоёмкость (до 30 Вт·ч/кг)
- Низкая цикличность (от 500 циклов)
- Необходимость обслуживания
- Эффект памяти
- Быстрый саморазряд
- Требования к условиям эксплуатации

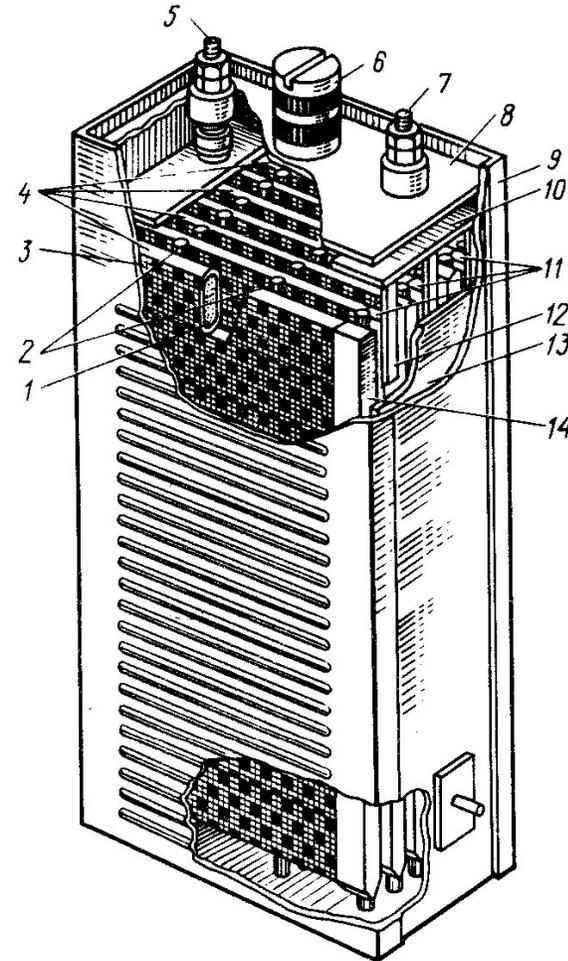
Никель-кадмиевые аккумуляторы

Плюсы:

- ▶ В два раза большая (по сравнению с кислотными системами) энергоёмкость
- ▶ Достаточно высокая цикличность (до 9000)
- ▶ Высокие токи заряда/разряда

Минусы:

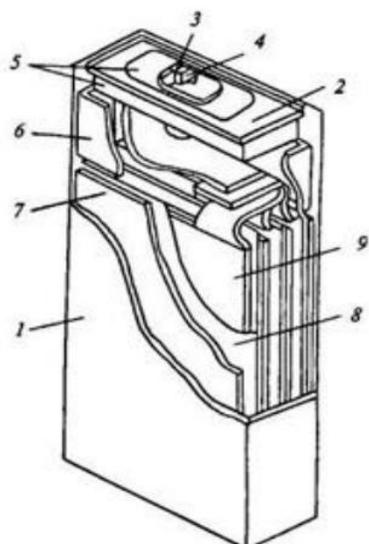
- Требовательны к условиям эксплуатации
- Эффект памяти
- Наличие в составе токсичного кадмия



Никель-металлогидридные аккумуляторы

Плюсы:

- ▶ Высокая ёмкость (на 20% выше, чем у никель-кадмиевых систем при тех же габаритах)
- ▶ Высокие токи заряда/разряда



- 1 – корпус;
- 2 – крышка,
- 3 – колпачок клапана;
- 4 – клапан;
- 5 – изоляционная прокладка;
- 6 – изолятор;
- 7 – отрицательный электрод;
- 8 – сепаратор;
- 9 – положительный электрод

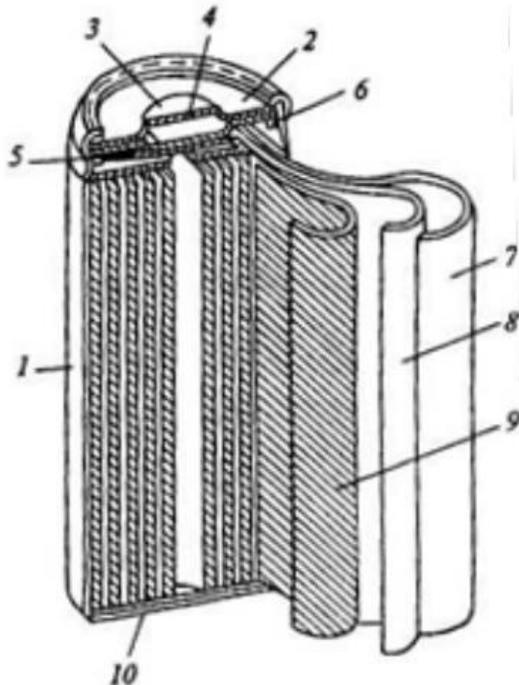
Минусы:

- Требовательны к условиям эксплуатации
- Низкая цикличность (ок. 1000)
- Саморазряд до 15% в месяц
- Высокая стоимость

Натрий-серные аккумуляторы

Плюсы:

- ▶ Высокая ёмкость (100-125 Вт·ч/кг)
- ▶ Относительно невысокая цена



- 1 – корпус;
- 2 – крышка;
- 3 – колпачок клапана;
- 4 – клапан;
- 5 – коллектор положительного электрода;
- 6 – изоляционное кольцо;
- 7 – отрицательный электрод;
- 8 сепаратор;
- 9 – положительный электрод;
- 10 - изолятор

Минусы:

- Высокие рабочие температуры (290-360°C).
- Невысокая цикличность (до 4000 циклов)
- Быстрый саморазряд

Литий-ионные и литий-полимерные аккумуляторы

Плюсы:

- ▶ Широкий температурный диапазон использования
- ▶ Цикличность практически обратно пропорциональна ёмкости: 40 000 циклов при энергоёмкости 85 Вт·ч/кг и менее 1000 при энергоёмкости 170 Вт·ч/кг
- ▶ Высокая сохраняемость



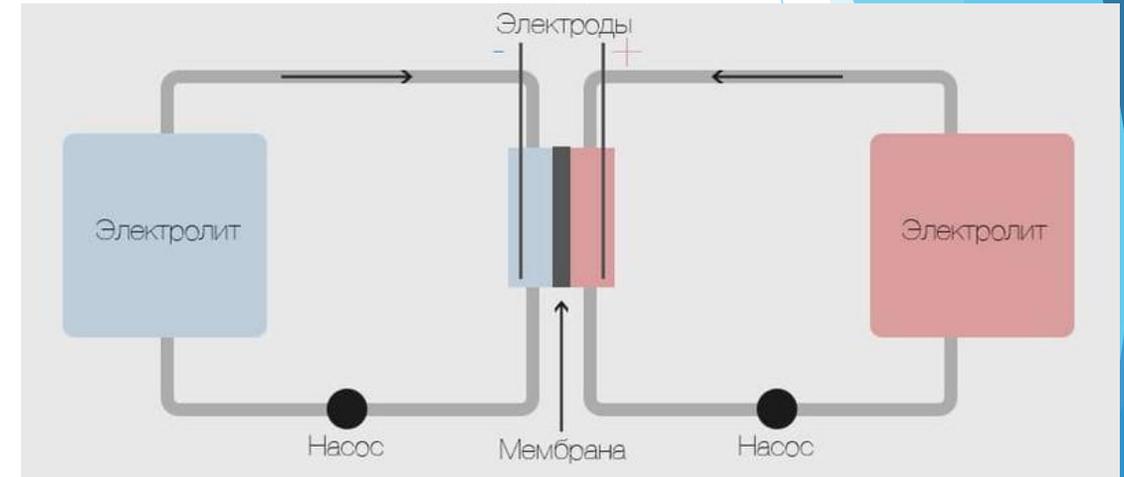
Минусы:

- Требуется сложная система контроля, составляющая приличную часть стоимости
- Достаточно высокая цена
- Взрыво-пожароопасность (особенно при коротких замыканиях)

Проточные редокс-аккумуляторы

Плюсы:

- ▶ Единственные из всех типов электрохимических аккумуляторов имеют 100% глубину разряда
- ▶ Перезарядку можно осуществлять как электрохимическим путём, так и заменой электролита
- ▶ Большой ресурс - более 6000 циклов



Минусы:

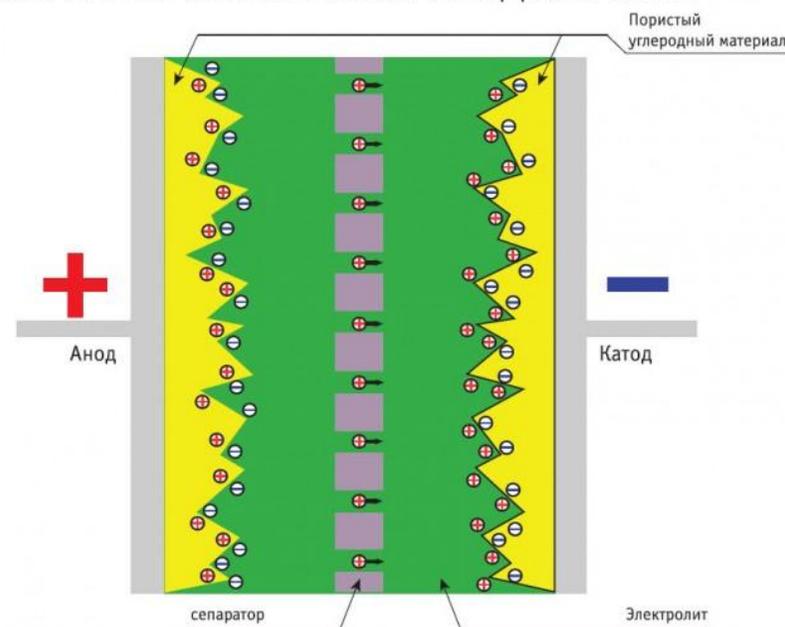
- Энергоёмкость на уровне кислотных аккумуляторов (до 32 Вт·ч/кг)
- Очень высокая цена

Суперконденсаторы

Плюсы:

- ▶ Не относятся к электрохимической системе, отсутствуют типичные для них проблемы
- ▶ Ресурс достигает миллиона циклов
- ▶ Быстро берут нагрузку
- ▶ Имеют большую удельную мощность

СХЕМА УСТРОЙСТВА СУПЕРКОНДЕНСАТОРА



Минусы:

- Принципиально малая энергоёмкость (до 10 Вт·ч/кг)
- Очень высокая цена

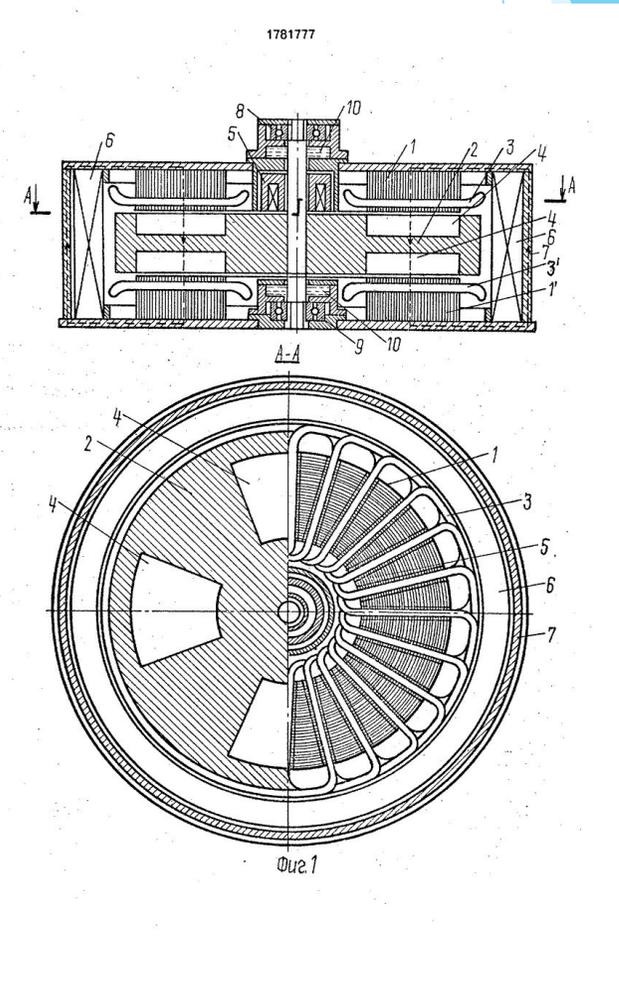
Кинетические накопители энергии (маховики)

Плюсы:

- ▶ высокая энергоёмкость (до 300 Вт·ч/кг);
- ▶ высокая удельную мощность;
- ▶ разрыво- и взрывобезопасность
- ▶ мгновенный отклик, достигаемый за счёт собственных свойств устройства;
- ▶ Непритязательность, простота эксплуатации и обслуживания;
- ▶ Длительный срок эксплуатации

Минусы:

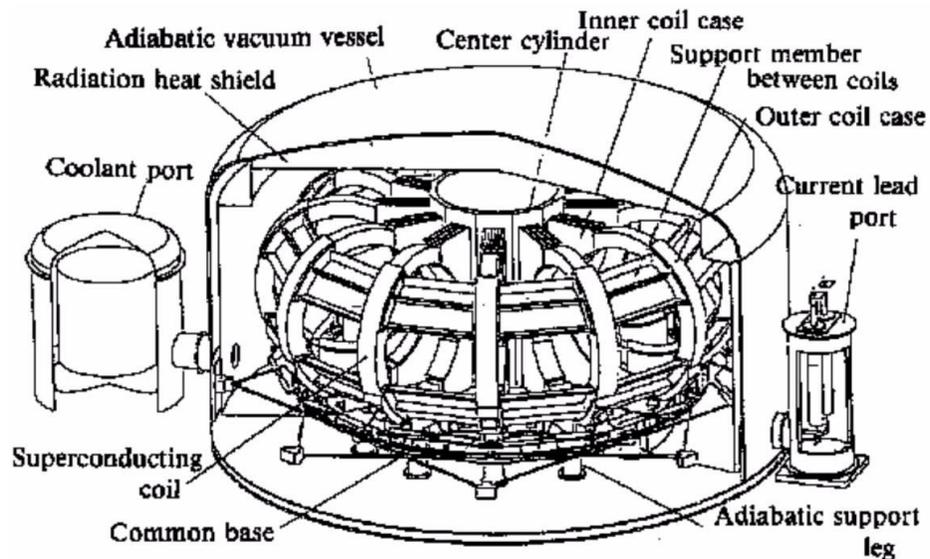
- Высокая стоимость из-за содержания высокотехнологичных материалов



Сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии (СПИНЭ)

Плюсы:

- ▶ высокая энергоемкость (до 200 Вт·ч/кг);
- ▶ КПД превышает 90%
- ▶ Длительный срок эксплуатации
- ▶ Ресурс порядка миллиона циклов



Минусы:

- Высокая стоимость из-за неразработанности технологии
- Высокие требования к системам охлаждения для поддержания состояния сверхпроводимости

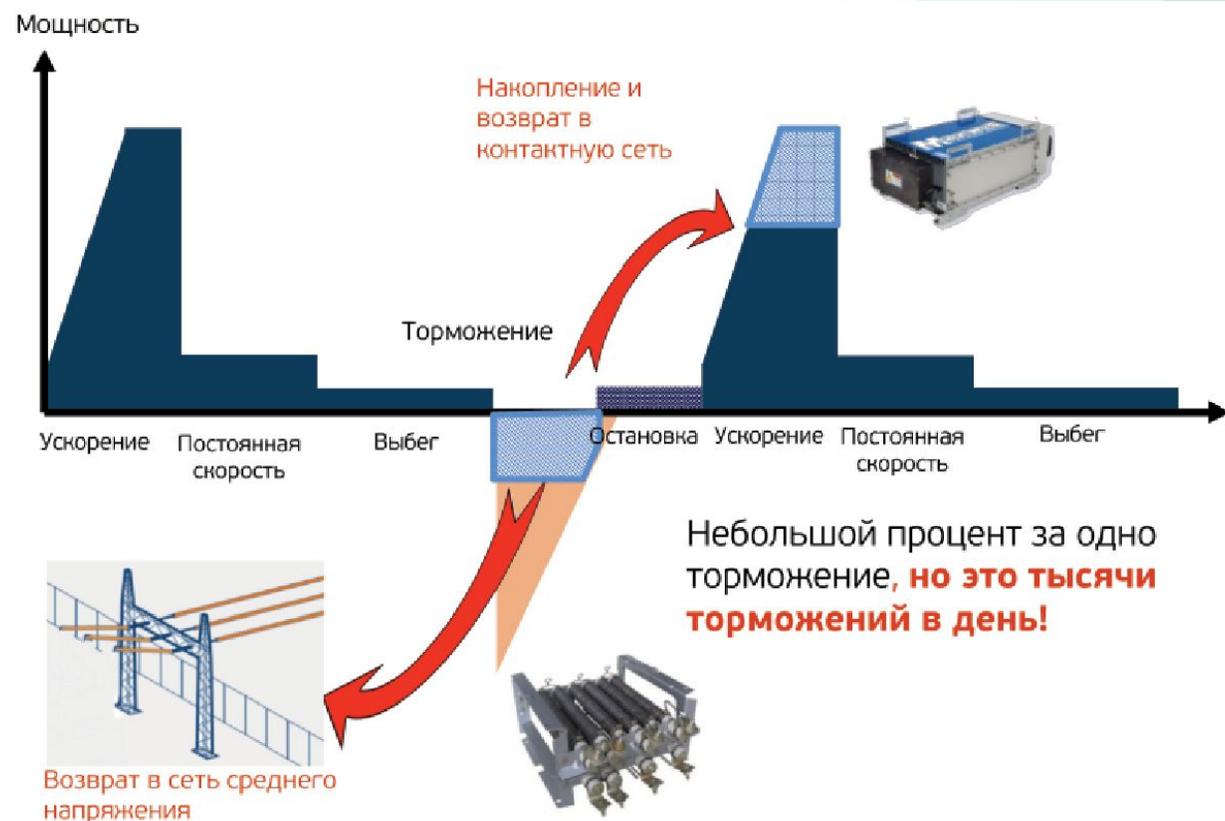
Мировой опыт использования накопителей энергии (примеры)

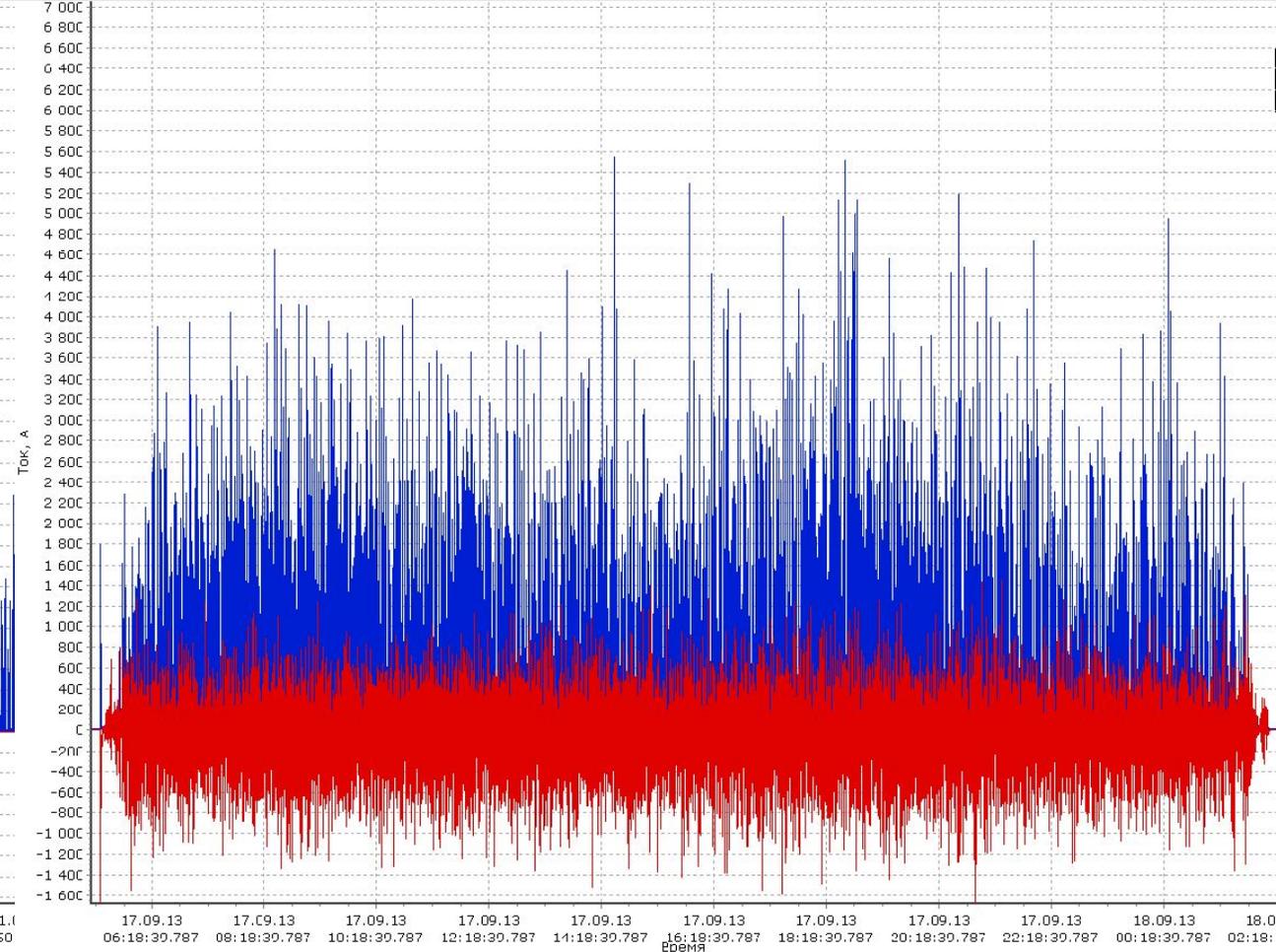
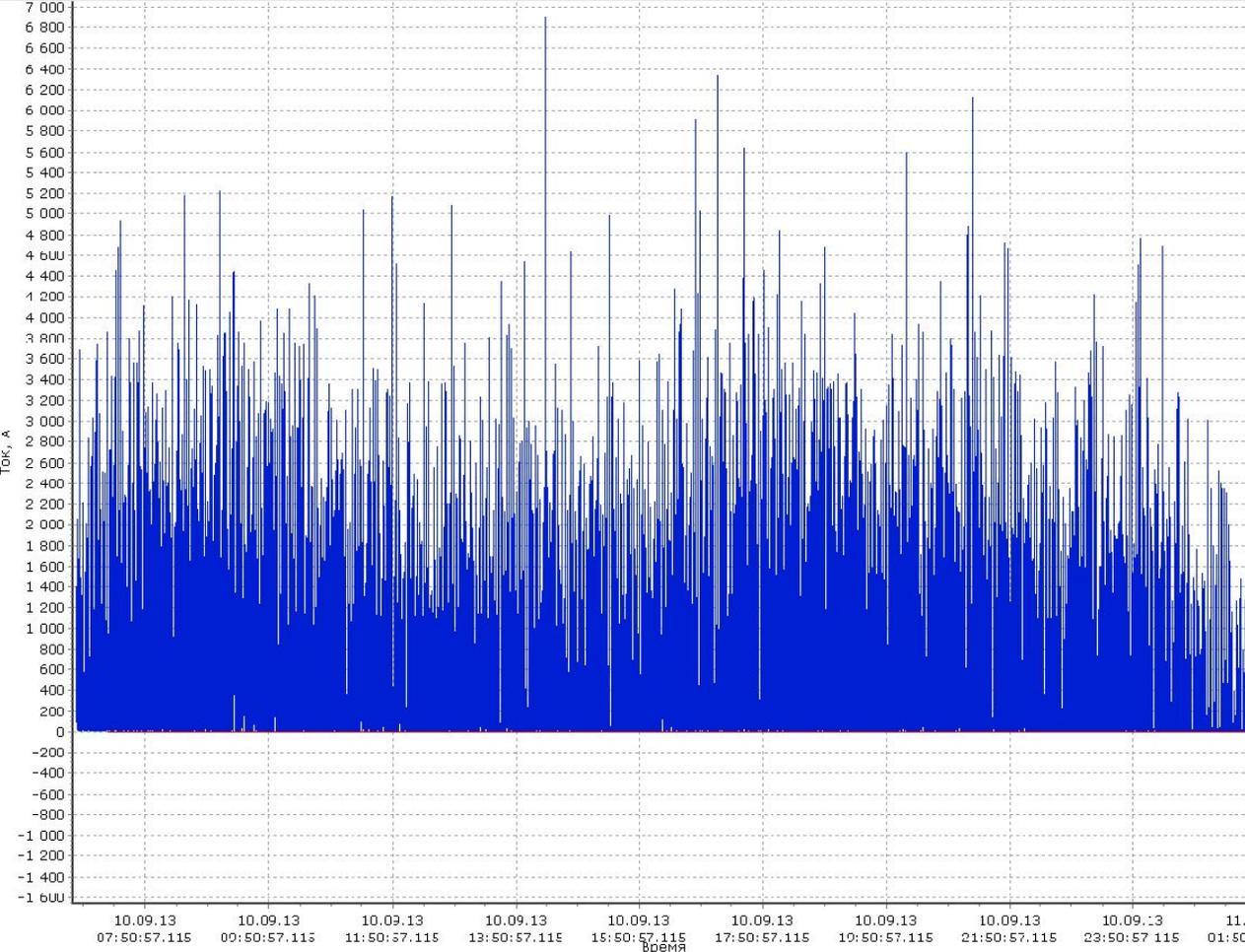
Место установки	Тип накопителя	Параметры	Результат
Ренне (Бретань, Франция)	Кинетический накопитель на подстанции	мощность 1 МВт и энергоемкость 5 кВт·ч	Экономия 5000 кВт·ч в неделю (260,7 тыс. кВт/час в год)
Лондон, Пикадилли лайн	Кинетический накопитель на подстанции		До 40% электроэнергии
Гамбург, подстанция Окзенцолль	Инерционные накопители	Мощность 1,65 МВт	экономия до 353 тыс. кВт·ч в год
Орегон	Бортовые суперконденсаторы		до 70 тыс. кВт·ч в год

Место установки	Тип накопителя	Параметры	Результат
Нью-Йорк	Бортовые инерционные накопители		до 30% энергии
Юго-Восточная Пенсильвания, подстанция Letterly	Система литий-ионных батарей	Мощность 1,5 МВт	Экономия до 60 000 долларов США в год на счетах за электроэнергию и приносит около 200 000 долларов США дохода от продажи электроэнергии

Опыт московского метрополитена в области обеспечения рекуперации

В 2013 году на тяговой подстанции Т-23 Филёвской линии московского метрополитена были установлены накопители энергии на основе электрохимических конденсаторов от российской фирмы ООО «ЭКЭ» («ЭЛТОН»)





Опытный период эксплуатации показал снижение потребляемой мощности подстанции на 13,4% по сравнению со значениями, полученными без использования накопителей энергии. Потери в тяговых агрегатах, в свою очередь, снизились на 15% (за счет снижения тягового тока).

