

РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ ТОРМОЖЕНИЯ ЗОТОВА А.И.

*Зотова Анастасия Игоревна - студент,
кафедра «Электроэнергетика транспорта»,
Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ)),
г. Москва*

Аннотация: в этой статье рассматривается проблема высокого уровня потребления электроэнергии Московским метрополитеном, который перевозит более 9 миллионов пассажиров. Отсутствие внедрения современных технологий, направленных на экономию электроэнергии, может привести к существенным трудностям в экономике. Одним из наиболее перспективных решений является рекуперация энергии торможения с помощью накопителей энергии (НЭ), которые позволяют сэкономить процент потребления электроэнергии и использовать ее дальше без особых потерь. Процесс накопления электрической энергии на стационарных накопителях энергии (НЭ) на станциях, за счет энергии рекуперации в момент торможения подвижного состава Московского метрополитена. Представлена схема использования энергии рекуперации и схема стационарного инерционного накопителя энергии

Ключевые слова: подвижной состав, системы накопителей энергии, метрополитен, энергия, рекуперация энергии торможения, контактная сеть, стационарные накопители энергии, электричество.

BRAKING ENERGY RECOVERY Zotova A.I.

*Zotova Anastasia Igorevna - Student,
DEPARTMENT OF "ELECTRIC POWER ENGINEERING OF TRANSPORT",
RUSSIAN UNIVERSITY OF TRANSPORT (RUT (MIIT)),
MOSCOW*

Abstract: this article examines the problem of high electricity consumption by the Moscow Metro, which carries more than 9 million passengers. The lack of implementation of modern technologies aimed at saving electricity can lead to significant difficulties in the economy. One of the most promising solutions is the recovery of braking energy using energy storage devices (NE), which allow you to save a certain percentage of consumed electricity and use it in the future without much loss. The process of accumulation of electric energy on stationary energy storage devices (NOT) at stations, due to energy recovery at the time of braking of the rolling stock of the Moscow Metro. A scheme for the use of energy recovery and a scheme for a stationary inertial energy storage are presented.

Keywords: rolling stock, energy storage systems, subway, energy, braking energy recovery, contact network, stationary energy storage, electricity.

УДК 621.311

Главной целью ученых всего мира является задача повышения энергоэффективности крупных городов, например Москва. Главным источником потребления электроэнергии в нем является Московский метрополитен. Московский метрополитен перевозит более 9 млн. человек каждый день, что составляет 60% пассажиропотока города [22, с. 1]. Если не внедрять в него новые технологии, которые помогают значительно экономить электрическую энергию, то экономика испытывала бы значительные трудности. К такой технологии относится рекуперация энергии торможения с помощью накопителей энергии (НЭ).

С помощью рекуперативного торможения часть энергии, затраченной на тягу, преобразуется в электроэнергию, которая может быть повторно использована в контактной сети. В ходе такого возврата механической энергии движущегося вагона происходят её многочисленные превращения, которые зависят как от состава тягового оборудования вагонов, так и от ситуации в контактной сети [5, с. 20; 23, с. 5]. Однако далеко не вся энергия при электродинамическом (рекуперативном) торможении поезда распределяется между остальными составами. Значительная часть выделяется на его возимых резистивных элементах в виде дополнительного тепла. Это тепло оказывает существенное влияние на нагрев воздуха как в туннелях, так и на станциях метро. Кроме того, эффективность рекуперативного торможения может варьироваться в зависимости от скорости движения поезда и состояния контактной сети. Например, при высоких скоростях процесс рекуперации может быть более эффективным, так как большее количество энергии может быть возвращено в сеть. Однако если сеть перегружена или не может принимать возвращаемую энергию, это приводит к дополнительным потерям. В таких ситуациях возникают проблемы с перегревом оборудования и ухудшением условий для пассажиров, что требует дополнительных мер для контроля температуры и вентиляции в подземных системах.

Такой вид транспорта, как метро приводится в движение за счет тяги, которая включается в себя контактную и рельсовую сети [18, с. 45; 20, с. 23]. На всех поездах имеется так называемый

электродвигатель. Электричество передается вдоль всего пути с помощью контактного рельса. Большинство рельсового транспорта имеет возможность электрического торможения с использованием рекуперативного торможения [8, с. 4; 9, с. 6; 12, с. 23]. В данном случае электродвигатель может работать, как генератор, восстанавливающий кинетическую энергию транспортного средства и преобразующий ее в электричество [6, с. 44; 7, с. 550; 8, с. 12; 9, с. 50; 10, с. 130; 11, с. 479; 12, с. 10]. В то время как некоторая часть запасенной кинетической энергии может быть повторно использована для запуска подвижного состава, оставшаяся энергия может быть отправлена обратно в сеть и, следовательно, восстановлена только если состав на соседнем пути ускоряется [13, с. 29; 14, с. 47; 15, с. 4]. В этом случае ускоряющийся состав использует эту передачу энергии. Если это не так, напряжение сети увеличивается из-за избытка энергии, и эта дополнительная энергия должна рассеиваться в тормозных резисторах. Данный принцип показан на рисунке 1.

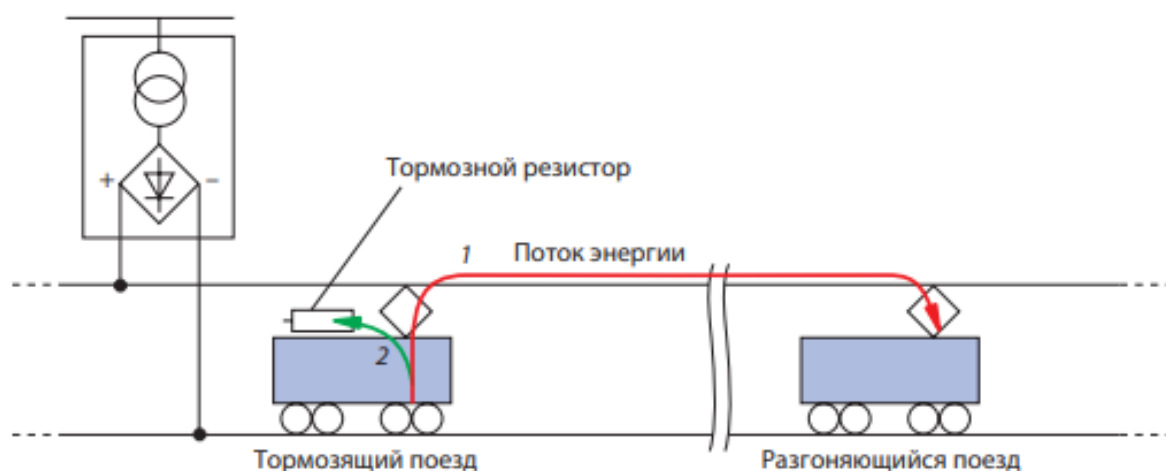


Рис. 1. Схема использования энергии рекуперации.

Внедрение систем НЭ позволяет экономить 25-30% энергии. Сами накопители энергии могут быть как бортовыми, так и стационарными [3, с. 7; 4, с. 10]. Для рекуперации энергии торможения, исходя из анализа технико-экономической эффективности, для метрополитена, больше подходят стационарные накопители энергии, которые устанавливаются на станциях метро. Стационарные накопители энергии обеспечивают промежуточное накопление рекуперированной энергии и ее дальнейшее целенаправленное использование соответствующими потребителями [1, с. 3; 3, с. 6].

Формула для расчета энергии рекуперации для стационарных накопителей энергии на подстанциях:

$$E = \int_{t_2}^{t_1} (U(t) - I(t)R)I(t) \cdot \eta(t)dt$$

E — энергия, рекуперированная за время t , [Дж]

$\eta(t)$ — эффективность рекуперации, которая может изменяться во времени [%]

$U(t)$ — напряжение на выходе накопителя в момент времени t , [В]

$I(t)$ — ток в момент времени t , [А]

t_1 и t_2 — начальное и конечное время рекуперации [сек]

R_1 — внутреннее сопротивление накопителя. [Ом]

Исходя из формулы, мы видим, что наша энергия рекуперации, получаемая стационарными накопителями энергии, в основном зависит от количества тока и напряжения в момент торможения, а их интеграции по времени дадут нам как раз энергию.

Использование стационарного накопителя энергии с инерционной массой на одной из тяговых подстанций метрополитена способствует экологически чистому и технически эффективному использованию энергии, которая выделяется в процессе рекуперативного торможения поездов [1, с. 78; 5, с. 12]. В противном случае энергия, выделяющаяся в процессе торможения, будет превращаться в тормозных резисторах в тепло. Важно отметить, что такие накопители не только сохраняют энергию, выделенную при торможении, но и, благодаря уменьшению потребления первичной энергии, способствуют снижению выбросов углекислого газа и, тем самым, улучшению качества воздуха.

Существуют стационарные накопители энергии различных систем: с вращающимися инерционными массами и статические.

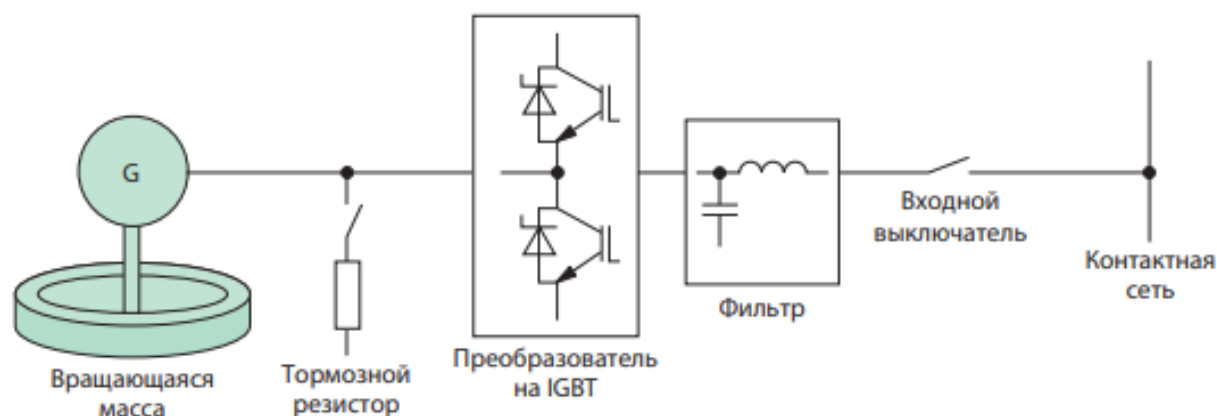


Рис. 2. Схема стационарного инерционного накопителя энергии.

Таким образом, благодаря внедрению системы накопителей энергии повышается энергоэффективность и экономичность Московского метрополитена.

Список литературы / References

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. Коэффициенты полезного действия накопителя энергии в контактной сети горэлектротранспорта // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30. № 4 (76). С. 127-141.
8. 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.
9. 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.
10. «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.
11. 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.
12. Саблин О.И. Повышение эффективности рекуперации энергии в системе электротранспорта при ограниченном тяговом электропотреблении // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – Т. 6, № 1 (20). – С. 21–25.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
 16. 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., Шевлюгин М.В., Плетнев Д.С., Белов М.Н., Минаков З.Е. // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". 2023. № 1. С. 119-129.
 17. Шевлюгин М.В. Система накопления энергии на вагоне метро для аварийного выхода поезда из туннеля. // Наука и техника транспорта. 2006. № 3. С. 29-33.
 18. Шевлюгин М.В. ЕНЭ на борту метропоезда. // Мир транспорта. 2007. Т. 5. № 1 (17). С. 46-49.
 19. 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.
 20. 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.
 21. Шевлюгин М.В., Желтов К.С. Устройство накопления электроэнергии для аварийного питания электроподвижного состава. Патент на полезную модель RU 56736 U1, 10.09.2006. Заявка № 2006116186/22 от 12.05.2006.
 22. 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.