



# Энергия рекуперативного торможения: копить или обмениваться?



Павел ВЕСЕЛОВ

Pavel A. VESELOV

## Regenerative Braking Energy: to Store or to Exchange?

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 81)

**В статье оцениваются способы реализации энергии рекуперативного торможения на линиях метрополитена, проводится анализ избыточной энергии при межпоездном обмене, приводятся результаты имитационного моделирования. В качестве приоритетного рассматривается вопрос о соотношении форм избыточной энергии, а также наличии условий, при которых межпоездной обмен или накопители энергии могут получить преимущества друг перед другом.**

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, рекуперативное торможение, метрополитен, накопитель энергии, межпоездной обмен.

*Веселов Павел Александрович – аспирант кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Россия.*

**Т**енденции метровагонастроения приближают день, когда возможность рекуперативного торможения (РкТ) будет иметь все 100 % подвижного состава метрополитенов. Ведь количество вагонов, способных рекуперировать, постоянно растет. До конца 2016 года только на Таганско-Краснопресненскую линию столицы поступили 216 современных вагонов 760-й серии, которые заменили свыше 60 % устаревших моделей в электродепо «Выхино». С 2017 по 2021 год в московский метрополитен для Таганско-Краснопресненской и Калужско-Рижской линий планируется поставить почти 1,5 тысячи вагонов нового поколения – 765-й серии [1].

Подобная перспектива открывает необходимость детального изучения процессов РкТ и разработки эффективных методик и программ оценки рекуперативного торможения. В частности, для решения этого круга задач предлагается методика оценки эффективности применения РкТ [2], позволяющая проводить имитационное моделирование, которое включает сравнение уровней реализации энергии РкТ посредством накопителей энергии (НЭ) и межпоездного обмена.

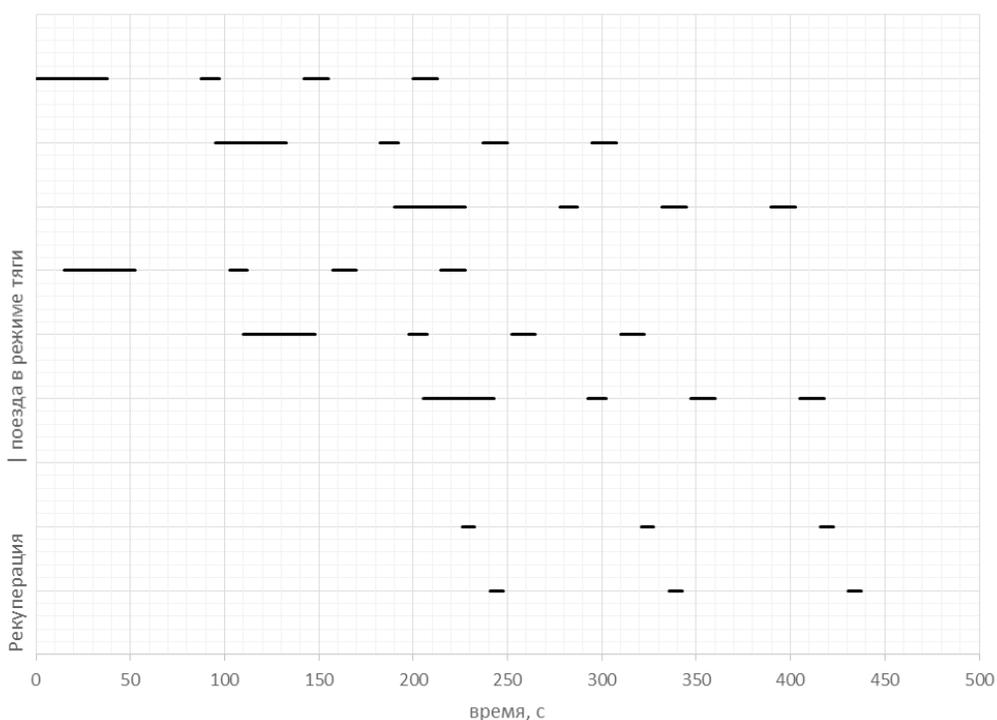


Рис. 1. Диаграмма режимов движения для одного перегона.

Таблица 1

Процентное соотношение энергии РкТ в межпоездном обмене к общей энергии рекуперативного торможения

Интервал, с	Характеристики перегонов				
	Малой длины	Средний, неэнергоэф. движение	Средний, энергоэф. движение	Большой длины, неэнергоэф.	Большой длины, энергоэф.
45	100 %	100 %	0 %	100 %	67,3 %
30	43,9 %	50 %	100 %	70,83 %	55,2 %
15	20,4 %	27,7 %	77,5 %	100 %	55,2 %
0	0 %	0 %	0 %	41,67 %	10,4 %

Имитационное моделирование проводилось с учётом наиболее значимых факторов — длины перегона, скорости сообщения на перегоне, интенсивности движения поездов (пар в час), интервалами между встречными направлениями движения [3]. Исследовалось энергоэффективное и неэнергоэффективное движение, перегоны различной протяжённости.

В первой части исследования анализировались данные для перегонов в отдельности, т.е. без возможности передачи энергии рекуперативного торможения в соседние секции (рис. 1). Накопительное устройство имеет несомненное преимущество при любых интервалах встречных направлений, а при отсутствии такого

интервала необходимо для трёх из пяти моделей (таблица 1).

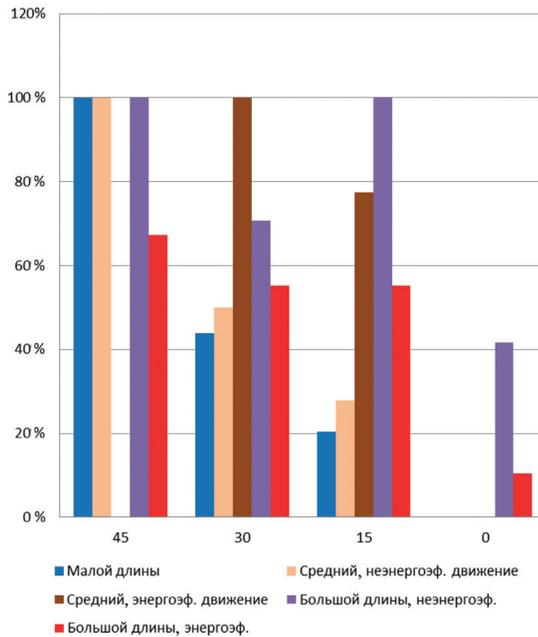
Вероятность межпоездного обмена сильно зависит от изменений в интервалах движения. Вариативность параметров движения и их непосредственное влияние на вероятность межпоездного обмена позволяют сделать вывод о заметном снижении эффективности рекуперативного торможения без НЭ, однако не исключают такой возможности. Выявлена низкая эффективность межпоездного обмена без применения программно-аппаратных комплексов управления движением, что может исключить возможность реализации энергии РкТ на межпоездном обмене при неблагоприятных параметрах эксплу-



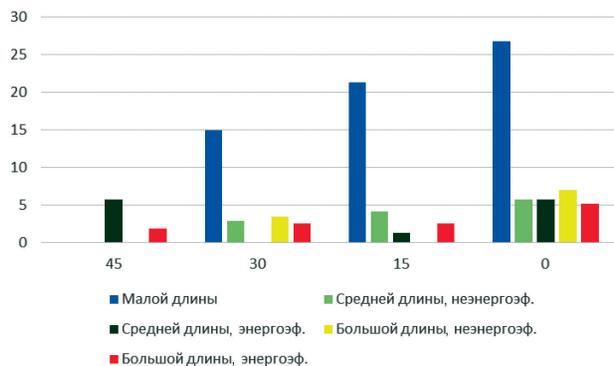
**Процентное соотношение энергии РкТ в межпоездном обмене к общей энергии рекуперативного торможения**

Характеристики перегонов			
Интервал, с	Малый – средний	Средний – длинный	Длинный – короткий
45	100 %	100 %	75,4 %
30	100 %	100 %	100 %
15	67,7 %	86,1 %	100 %
0	8,3 %	55,2 %	100 %

**Рис. 2. Процентные значения энергии РкТ при сравнении межпоездного обмена и НЭ.**



**Рис. 3. Относительные значения избыточной энергии РкТ.**



тации. В процентном соотношении полезная энергия рекуперативного торможения в межпоездном обмене, по сравнению с накопителем энергии, снижается по мере уменьшения интервала между встречными направлениями (рис. 2). Относительные значения избыточной энергии к общей энергии рекуперативного торможения возрастали с уменьшением интервала между встречными направлениями движения (рис. 3).

Во второй части исследования анализировались данные для двух соседних перегонов, т.е. с возможностью передачи энергии рекуперативного торможения в соседние секции (рис. 4). Накопительное устройство в этом случае также имеет преимущество при любых интервалах встречных направлений движения, однако достижимая эффективность реализации энергии рекуперативного торможения выше, в большей части интервалов межпо-

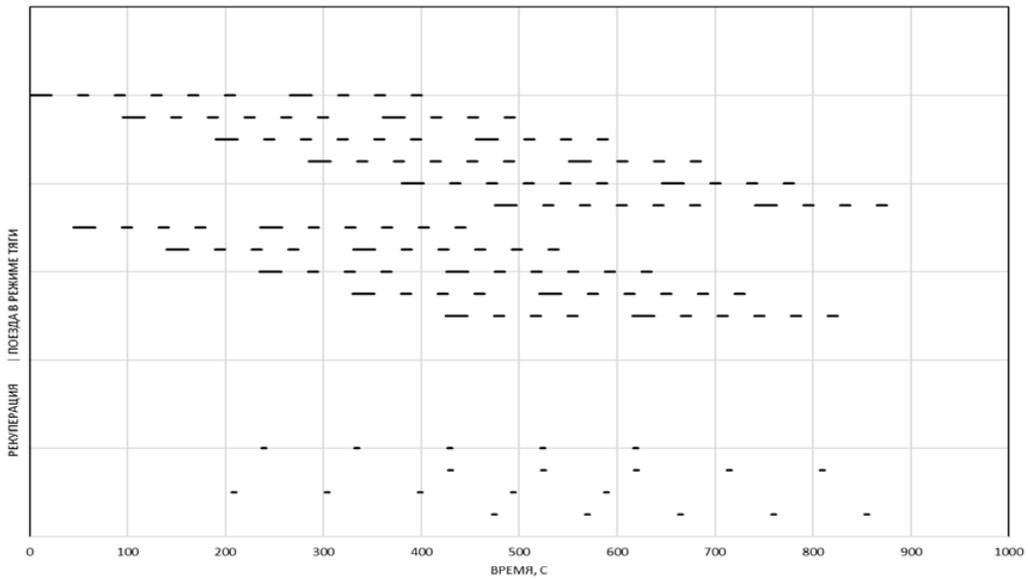


Рис. 4. Диаграмма режимов движения при интервалах между встречными поездами в 45 с для двух соседних перегонов.

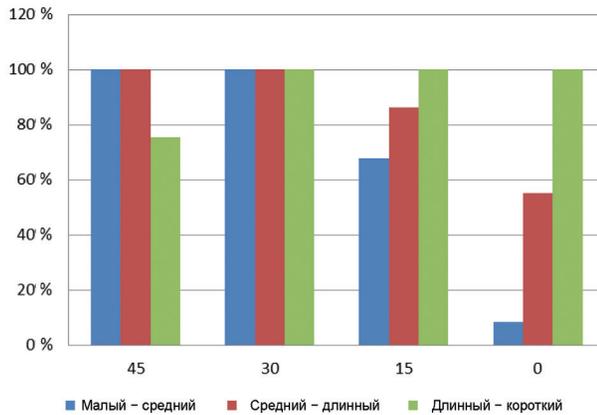


Рис. 5. Процентные значения энергии РКТ при сравнении межпоездного обмена и НЭ.

ездной обмен не уступал накопителю энергии (таблица 2).

В процентном соотношении полезная энергия рекуперативного торможения в межпоездном обмене, по сравнению с накопителем энергии, опять снижается по мере уменьшения интервала между встречными направлениями (рис. 5).

Относительные значения избыточной энергии к общей энергии рекуперативного торможения также возрастали с уменьшением интервала между встречными направлениями движения (рис. 6).

При наличии возможности передачи энергии в соседнюю секцию вероятность межпоездного обмена повышается, однако

продолжает проигрывать НЭ по эффективности.

## ВЫВОДЫ

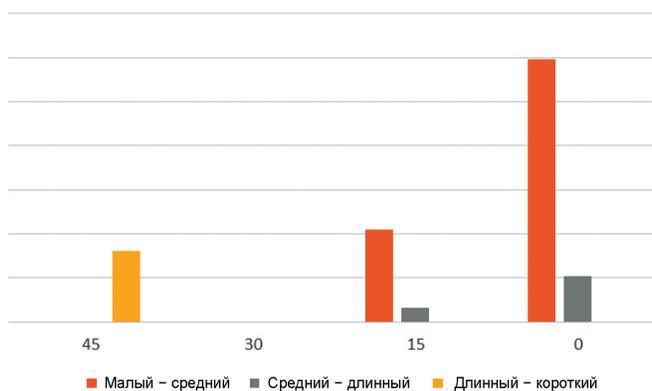
1) Доказано, что вероятность межпоездного обмена критически зависит от интенсивности движения (пар поездов в час) и интервалов движения поездов встречных направлений. Установлено, что вероятность межпоездного обмена вследствие данных факторов при 38 парах поездов в час находится в интервале от 0 % до 100 % для разных перегонов между станциями.

2) Проведено моделирование движения по перегонам с изменяемым временем стоянки на станциях, изучено влияние





Рис. 6. Относительные значения избыточной энергии РкТ.



данного фактора на вероятность межпоездного обмена. Доказано, что в отсутствие систем программного управления движением электропоездов метрополитена отклонения в номинальном значении названного фактора способны существенно влиять на вероятность успешной реализации энергии рекуперативного торможения в межпоездном обмене, что подтверждает версию о необходимости накопительного устройства [7, 8].

3) Проведены расчётные исследования избыточной энергии рекуперативного торможения для межпоездного обмена на перегонах различной длины. По результатам имитационного моделирования доказано, что межпоездный обмен может относительно успешно конкурировать с накопителем энергии только при наличии двух факторов: первый — высокая интенсивность движения, второй — возможность передачи энергии в контактную сеть соседних перегонов.

4) Доказано преимущество накопительного устройства перед реализацией энергии рекуперативного торможения в межпоездном обмене при эксплуатационных параметрах, идентичных московскому метрополитену. Прогнозное значение энергоэффективности РкТ для этого метрополитена, согласно проведённого имитационного моделирования, при использовании рекуперативно-реостатного торможения и накопительных устройств составляет 10–15 % от затрат на тягу электропоездов, что согласуется с имеющимися данными испытаний [4] и ожи-

даниями экспертов отрасли [5]. Электропоезда с асинхронным тяговым электроприводом и наиболее эффективной зоной скоростей рекуперативного торможения в 5–50 км/ч [6] способны увеличить показатель энергоэффективности до прогнозного значения в 20 % от затрат на тягу при благоприятных эксплуатационных условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. На Таганско-Краснопресненской линии появятся 120 новых вагонов. Официальный сайт Московского метрополитена [Электронный ресурс]: <http://mosmetro.ru/press/news/1625/>. Доступ 11.04.2017.
2. Веселов П. А. К вопросу применения имитационных моделей движения для исследования эффективности рекуперативного торможения в метрополитенах // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2017. — № 1. — С. 16–18.
3. Веселов П. А. Результаты оценки эффективности рекуперативного торможения в метрополитене на базе имитационного моделирования движения // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. — 2017. — № 32. — С. 65–70.
4. Гречишников В. А., Шевлюгин М. В. Эксплуатация накопителя электроэнергии на метрополитене // Мир транспорта. — 2013. — № 5. — С. 54–58.
5. Ян Хардер. Партнерство транспортных компаний и университетов — ключ к инновационному развитию // Мир транспорта. — 2015. — № 1. — С. 226–242.
6. Regenerative Braking in Metro Rolling Stock. Official internet site of the Indian Institution of railway electrical engineers. [Электронный ресурс]: [http://www.ireeindia.org/seminar\\_pdf/regen\\_braking.pdf](http://www.ireeindia.org/seminar_pdf/regen_braking.pdf). Доступ 11.04.2017.
7. Alper Kara, Kevork Mardikyan, Saim Baran. Analysis of regenerative braking and energy storage systems in urban rail transportation, «Engineering Science and Technology, an International Journal», 2013, № 16(2), pp. 75–79.
8. Bin Wang, Zhongping Yang, Fei Lin, Wei Zhao. An Improved Genetic Algorithm for Optimal Stationary Energy Storage System Locating and Sizing, «Energies», 2014, № 7, 2014, pp. 6434–6458. ●

Координаты автора: **Веселов П. А.** – veselov.tpem@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 11.04.2017, принята к публикации 15.06.2017.