

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАЦИИ В МЕТРОПОЛИТЕНАХ

**Веселов П.А.,**  
аспирант, НИУ «МЭИ»,  
veselov.tpem@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема применения рекуперативного торможения в метрополитене, как способа повышения энергоэффективности. Приводится сравнительный анализ основных возможных способов решения проблемы, их плюсы и минусы. Предлагается техническое решение для реализации применения рекуперативного торможения. Также приводится описание экспериментально полученных целевых показателей и их сравнение с международным опытом в данном направлении.

**Ключевые слова:** метрополитен, вагоны 81-717/14, двигатели постоянного тока с независимым возбуждением, рекуперация, накопители электроэнергии.

## SPECIFICITY OF USING BRAKING ENERGY RECOVERY AT THE SUBWAYS

**P. Veselov,**  
National Research University "Moscow Power Engineering Institute".

**Abstract.** The article considers the problems of using braking energy recovery at the subways, as a way of enhancing energy efficiency. This article provides comparative analysis of the main possible solutions of the problem, their pros and cons, a description of the technical solution to implement the use of braking energy recovery. Also describes the experimentally obtained target values and their comparison with the international experience.

**Keywords:** underground, subway cars 81-717/14, DC motor with independent excitation, braking energy recovery, electric energy storage devices.

**В** настоящее время вопрос о способах и путях качественного улучшения технико-экономических показателей метрополитена особенно актуален. Только московский метрополитен, согласно постановлению Правительства Москвы от 04.05.2012 N 194-ПП "Об утверждении Перечня объектов перспективного строительства Московского метрополитена в 2012-2020 гг.", до 2020 г. введет в эксплуатацию, по сравнению с 2011 г., более 150 км новых линий метро. Метрополитены – крупные потребители электроэнергии, что делает вопрос повышения энергоэффективности метрополитенов особенно важным.

Стоит отметить, что существенными недостатками большинства вагонов метрополитенов на данный момент являются:

- контакторное дискретное регулирование сил тяги и торможения;
- отсутствие рекуперативного торможения;
- существенные колебания силы тяги при пуске, в частности, из-за ступенчатого изменения ослабления поля.

Для решения данных проблем в НИУ «МЭИ» на кафедре «Электрический транспорт» был разработан проект модернизации вагонов 81-717/14 с управлением тяговым электроприводом с помощью IGBT транзисторов и независимым возбуждением тяговых машин (ТМ).

Известно, что ТМ обратимы, т.е. одна и та же ТМ может работать и как генератор, так и электродвигатель. При рекуперативном торможении (РкТ) электродвигатель переходит в генераторный режим. При этом двигатель преобразует механическую энергию, полученную от движущихся частей привода, в электрическую. Этот режим наступает, когда частота вращения якоря превышает частоту вращения холостого хода  $n_0$ . В этих условиях ЭДС машины  $E_a = C_e \phi n_0$  превышает напряжение питающей сети ( $E_a > U_{ном}$ ), при этом ток якоря, а следовательно, и электромагнитный момент меняют свое направление на противоположное. Электромагнитный момент двигателя становится тормозящим и противодействует внешнему вращающему моменту, создаваемому силами

инерции вращающего с прежней скоростью якоря. Этот процесс торможения будет продолжаться до тех пор, пока частота вращения якоря, уменьшаясь, не достигнет значения  $n_0$ . Таким образом, для перехода ТМ с НВ в режим генераторного рекуперативного торможения не требуется дополнительных изменений в схеме включения двигателя.

Проект предусматривает возможность модернизации при проведении капитальных ремонтов серийных вагонов 81-717/14 и их модификаций с целью улучшения их технических характеристик и получения возможности применения РкТ. Таким образом, «номерные» вагоны, пройдя модернизацию, могут оказаться конкурентоспособны с минимальными финансовыми затратами, а управление сопротивлениями с помощью IGBT позволяет добиться плавных характеристик, которые, в виду большой частоты транзисторного ключа, означают повышение комфорта для пассажиров, и упрощение управления ЭПС для машиниста. В проекте предусмотрена перегруппировка ТМ в режимах тяги и торможения, благодаря которой, в частности, скорость окончания РкТ находится в районе 20 км/ч, что повышает возможный экономический эффект от рекуперации и положительно отразится на потенциально возможных показателях энергоэффективности таких вагонов.

Специфика метрополитена, отличающая его от других видов электрического транспорта, состоит в малой протяженности межподстанционной зоны, то есть в небольшом числе составов, одновременно находящихся на одной зоне (секции). Поэтому применение РкТ в метрополитене требует наличия потребителя рекуперированной электроэнергии на секции. Теоретически, наиболее экономически выгодным потребителем энергии рекуперации является электроподвижной состав (ЭПС) в режиме тяги, то есть вся энергия рекуперации должна идти на межпоездной обмен. Но для реализации межпоездного обмена в метрополитене, в целях получения максимального экономического эффекта от РкТ, нужно предусмотреть возможность передачи избыточной энергии рекуперации в соседнюю секцию, что является, на данный момент, перспективной задачей, однако не-

возможно при нынешнем оборудовании сетей электроснабжения метрополитенов. Идеализированный теоретически, практически данный способ имеет один существенный недостаток, а именно то, что он все равно требует установки стационарных накопителей энергии (НЭ) для случаев отсутствия таких потребителей. Так как, на данный момент, в метрополитенах Российской Федерации не применяется система автоведения, говорить о подборе интервалов движения или математических моделей, позволяющих использовать РкТ круглосуточно, а не только в определенные часы (часы «пик»), не представляется возможным. Человеческий фактор, не вовремя закрытые двери из-за пассажиров, смещение графика из-за чрезвычайных происшествий и т.д. исключает возможность стабильного применения РкТ при наличии специального графика движения из-за его непостоянства и множества внешних факторов в виду относительно коротких промежутков времени, когда ЭПС находится в режиме пуска или РкТ.

Способ применения РкТ в виде передачи рекуперированной энергии во внешнюю сеть не рассматривается, т.к. сильные скачки напряжения и тока, множество «паразитных» высоких гармоник и необходимость дорогостоящего переоборудования ТП делает его нецелесообразным.

Таким образом, говоря о применении РкТ считается целесообразным и рассматривался в проекте только вариант установки НЭ на тяговых подстанциях (ТП). Опыт эксплуатации, в том числе зарубежных коллег, подтверждает результативность поглотителей избыточной энергии рекуперации, по разным данным НЭ позволяют экономить от 15% до 40% энергии пуска.<sup>[1,2,3]</sup> Важно отметить, что зарубежный опыт применения РкТ в метрополитенах, описанный во множестве публикаций, в принципе ограничивается применением именно НЭ различных видов. Собственные исследования, проведенные на кафедре Электрического транспорта НИУ «МЭИ», показали, что экономический эффект от РкТ и стационарных накопителей, установленных на Филевской линии Московского метрополитена может достигать 40600 кВт\*ч в день. И это при том, что исследование РкТ проводилось на

сравнительно небольшой линии – всего 11 станций, а также применение РкТ только в течении 5 часов пиковой нагрузки в день (наименьший интервал движения). Говоря о технико-экономических показателях важно отметить, что установка опытных образцов НЭ на двух ТП, а именно Т23 и Т24, обошлась городу в ~ 50 млн. руб. Само по себе применение НЭ, однако, при данной, несомненно высокой стоимости установки, для сброса на них рекуперированной энергии может оказаться экономически невыгодным, т.к. при стоимости кВт\*ч электроэнергии в 4 рубля экономический эффект от накопителей может достигать ~60 млн. руб в год, т.е. фактически только окупать оборудование двух подстанций в год, не считая затраты на эксплуатацию. Но НЭ могут являться также решением проблем излишних тепловых выбросов в туннели. Наверняка многие сталкивались с тем, что подходя к открывающимся дверям поезда метро из под вагона

ощущается горячий воздух. Причина заключается в реостатном торможении, при котором ток, вырабатываемый двигателями при торможении «сжигается» на реостатах, преобразуясь в тепло.

Исходя из проведенных исследований можно сделать вывод, что внедрение НЭ способствует:

- повышению энергоэффективности метрополитенов путем применения РкТ;
- снижению тепловых выбросов в туннель, и, соответственно, снижению расходов на вентиляцию и кондиционирование, улучшение климата на станциях, в туннелях и вагонах метро.

Также важно, что НЭ возможно рассматривать и в качестве резервного источника энергии в аварийной ситуации, что дает возможность при отсутствии внешних источников питания довести ПС до станции и эвакуировать пассажиров и что положительно сказывается на безопасности метрополитенов.

### Список литературы

1. Joel Hruska, Philadelphia unveils new hybrid subway trains that use Prius-like regenerative braking to feed energy back into the grid / Информационный портал «Extremetech» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [<http://www.extremetech.com/extreme/180636-philadelphia-unveils-new-hybrid-subway-system-that-uses-prius-like-regenerative-braking-to-feed-energy-back-into-the-grid>].
2. A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, J.P. Powell, Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy / выставка-конференция «Transport Research Arena 2014», г. Париж, Франция, 2014 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [[http://tra2014.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014\\_Paper\\_19902.pdf](http://tra2014.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014_Paper_19902.pdf)].
3. Сулим А. А., Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена [Текст]: матер. X межд. науч.-тех. конф. / А. А. Сулим, С. Д. Сичев, В. Р. Распопин // Электромеханические и энергетические системы, методы моделирования и оптимизации. - КНУ им. М. Остроградского, 2012. - С. 344.