

УДК 629.423.1

О. И. САБЛИН – к. т. н., доцент, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, olegsss@i.ua

**ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ***Статью представил д. т. н., доц. А. Н. Муха***Введение**

Электрический транспорт является единственным видом транспорта, возобновляющим затраченную на тягу электроэнергию, путем ее рекуперации. Рекуперативное торможение является самым мощным источником снижения энергоемкости системы электрической тяги, который на современной технической базе позволяет сократить расход электроэнергии в системе на 30...40 %, однако до настоящего времени по ряду причин этот потенциал не используется в полной мере.

**Цель статьи**

Проанализировать текущее состояние эффективности использования электроэнергии рекуперации и оценить факторы, влияющие на этот процесс. Обосновать проблемы рекуперации энергии в системе электрической тяги и сформулировать направления исследований для их решения.

**Обзор литературы**

Исследования, разработка и совершенствование систем и режимов рекуперативного торможения ведутся на протяжении всего периода эксплуатации электротранспорта. Основные направления исследований заключаются в разработке рациональных режимов движения для увеличения объемов рекуперации энергии, повышении эффективности ее использования, повышении надежности оборудования при рекуперации и автоматизации режима.

Количество электроэнергии (кВт·ч) рекуперированной для снижения скорости электроподвижного состава (ЭПС) опреде-

ляется изменением кинетической и потенциальной энергий поезда за время торможения и в общем случае определяется по выражению [1, 2]

$$A_p = 1,073G(1 + \gamma)(v_n^2 - v_k^2) \times 10^{-5} \left( 1 - \frac{w_0 \pm i_{cp}}{102(1 + \gamma)a} \right) \eta_p, \quad (1)$$

где  $G$  – вес транспортного средства, кН;  $(1 + \gamma)$  – коэффициент инерции вращающихся масс ( $\sim 1,06$ );  $v_n, v_k$  – скорость соответственно в начале и конце рекуперации (торможения), м/с;  $a$  – замедление ЭПС при рекуперации, м/с<sup>2</sup>;  $w_0$  – основное удельное сопротивление движению поезда на участке рекуперации, Н/кН;  $i_{cp}$  – средний уклон участка торможения, ‰;  $\eta_p$  – КПД рекуперированной ЭПС (для электровазов  $\sim 0,85$ ).

Методы увеличения энергии рекуперации на основе рациональных режимов торможения ЭПС на сегодня достаточно разработаны. Например, для увеличения количества энергии рекуперации грузовых электровазов в [3] предлагается применять так называемую интенсивную рекуперацию, под которой понимается торможение, обеспечивающее увеличение сгенерированной энергии по сравнению с традиционной рекуперацией на спуске за счет приемлемого увеличения перегонного времени хода и меньших замедлений при торможении (более долгого торможения). Рациональное замедление предлагается выбирать в диапазоне 0,02...0,05 м/с<sup>2</sup>, по сравнению с традиционным 0,1...0,4, а заявляемое автором увеличение рекуперированной энергии при этом достигает 50 %, что объясняется в ра-

боте более эффективным использованием потенциальной энергии поезда.

Эффективное использование энергии рекуперации требует развития методов и средств относительно режимов системы тягового электроснабжения (СТЭ). Так на основе имитационного моделирования в [4] исследовано влияние рекуперации на потери электроэнергии в оборудовании СТЭ тяги постоянного тока. Установлено, что перетоки энергии рекуперации по тяговой сети на соседние межподстанционные зоны (МПЗ) приводят к увеличению технических потерь в среднем на 0,4 %. В работе рассчитан уровень оптимальных напряжений холостого хода на шинах тяговых подстанций (ТП), что позволяет за счет перетоков мощности рекуперации на соседние МПЗ увеличить объемы рекуперированной электроэнергии на 10,6 % и более чем в два раза уменьшить количество срывов рекуперативного торможения. Это в конечном итоге привело к снижению расхода электроэнергии по счетчикам тяговых подстанций на исследуемом участке на 4,8 %.

Теоретически, при идеализированных условиях рекуперация позволяет возвращать в сеть до 40...50 % израсходованной энергии [5]. Реально, на сегодня достигается максимальная экономия энергии в грузовом движении 3...12 %, а при циклической тяге – 15...25 %, что зависит от профиля пути и параметров ЭПС.

### Основной материал

В условиях реальной эксплуатации на величину энергии рекуперации кроме параметров, входящих в (1), существенно влияет режим напряжения на токоприемнике ЭПС, который определяется уровнем тягового электропотребления других поездов в зоне рекуперации [4], поэтому чаще всего при рекуперативном торможении реализуется энергия

$$A'_p < A_p, \quad (2)$$

а ее нереализованная часть

$$\Delta A_p = A_p - A'_p \quad (3)$$

утилизируется в тормозных устройствах. Избыточная энергия рекуперации  $\Delta A_p$  на разных участках является вероятностной величиной и при существующих размерах и графиках движения может достигать 30...100 %. В эксплуатации это проявляется в так называемых срывах режима рекуперации и утрате потенциально возможной энергии торможения (потере энергии в тормозах).

Оценить уровень избыточной энергии рекуперации представляется возможным либо на основе тяговых расчетов нагрузок и режимов СТЭ при заданном графике движения поездов либо путем измерения электроэнергии по показаниям счетчиков на поглощающих резисторах (инверторах) ТП или тормозных реостатах на ЭПС в режиме реостатного торможения (при наличии таких счетчиков). Так, например, для некоторых участков Донецкой железной дороги со значительными спусками энергия рекуперации может составлять до 40 % от затраченной энергии на тягу, однако анализ исполненных графиков движения поездов на данных участках, показывает, что на тягу используется не более половины от возможной энергии рекуперации.

На ТП постоянного тока (3,3 кВ) оборудованных инверторами избыточная энергия рекуперации может быть возвращена во внешнюю систему электроснабжения, что однако может вызывать ухудшения режимов работы питающей сети. Для пояснения последнего на рис. 1 представлены графики мощности некоторых видов ЭПС постоянного тока в одном из режимов работы, из которых видно, что электротранспорт рекуперировывает нестабильную энергию, причем у городского электротранспорта мощность рекуперации носит более кратковременный характер (2...15 с), чем у магистральных электропоездов (2...15 мин.), что связано с более динамичными режимами движения.

У электропоездов, например пик-фактор генерируемой мощности  $p(t)$  при рекуперации достигает 7,52, коэффициент формы 3,72, а коэффициент гармоник 3,6 [6], а у трамваев эти показатели еще хуже.

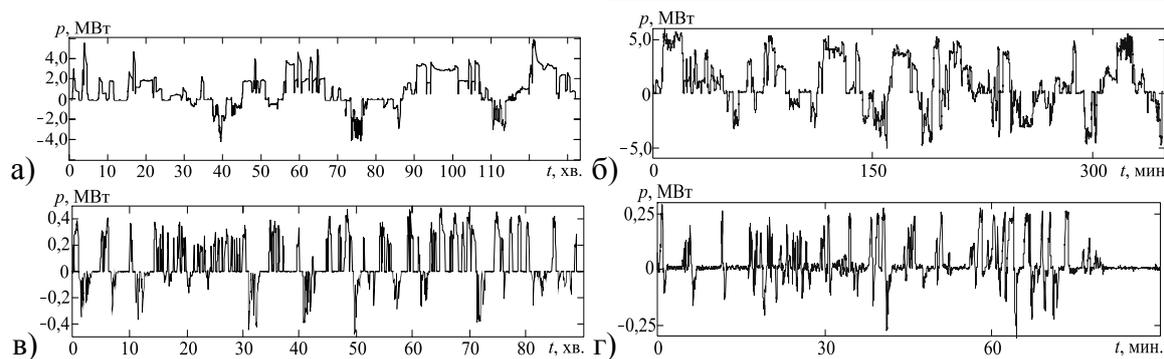


Рис. 1. Временные диаграммы мощности электровоза с грузовым поездом (а, б) и вагона трамвая (в, г) [7] в одном из режимов работы (рекуперация при  $p < 0$ )

При передаче в питающую сеть энергии с такими параметрами в ней возникают импульсные искажения (в виде низкочастотной модуляции тока сети), ухудшающие работу нетяговых потребителей, подключенных в общем узле с инверторной ТП. Кроме этого, передача энергии рекуперации по тяговой сети до инвертирования сопровождается повышенными потерями.

При отсутствии инверторов и поглощающих резисторов на тяговых подстанциях постоянного тока, а также отсутствии потребителей в зоне рекуперации на токоприемниках рекуперирующих поездов увеличивается напряжение. В системе электрической тяги постоянного тока при наличии приемников на соседних МПЗ возможно перетекание энергии рекуперации через шины ТП, что, однако сопровождается увеличением потерь в тяговой сети [8], особенно на однопутных участках. При значительном удалении приемников от зоны рекуперации напряжение на токоприемнике рекуперирующего поезда возрастает до значения 3,95 кВ, после чего рекуперация отключается и электротяговое средство переходит в режим реостатного торможения.

На ТП системы электроснабжения тяги переменного тока (27,5 кВ, 50 Гц) избыточная энергия рекуперации при определенных условиях непосредственно может быть возвращена во внешнюю систему электроснабжения, однако она обладает перечисленными недостатками. Здесь важно отметить, что возврат избыточной энергии рекуперации в первичную энергосистему с ТП как постоянного тока (после инвертирования) так и переменного тока (непо-

средственно) возможен при условии, что система внешнего электроснабжения способна принять эту энергию. В таком случае на первый план выходит развитие методов локализации избыточной энергии рекуперации в системе электрической тяги. В этой связи организационным мероприятием по повышению эффективности использования данной энергии является разработка энергооптимальных графиков движения поездов.

Техническими мероприятиями по эффективному использованию избыточной энергии рекуперации внутри системы электрической тяги сегодня является внедрение накопителей электроэнергии. Применение накопителей в системе электроснабжения электрической тяги кроме этого позволяет существенно снизить установленную мощность ТП. Так, например, в системе электроснабжения метрополитенов положительно зарекомендовали себя инерционные механические накопители, а возможность использования емкостных или сверхпроводящих индуктивных энергоемких элементов еще исследуется. С другой стороны разрабатываются схемные решения на предмет применения накопительных устройств непосредственно на борту неавтономного электротранспорта (по типу электромобилей), где в качестве аккумулирующих элементов на сегодня рассматриваются только конденсаторы. Преимуществом такого расположения является минимизация потерь энергии рекуперации при ее передаче до накопителя, однако это ухудшает массогабаритные показатели ЭПС. В этой связи вопрос об оптимальном

расположении накопительного элемента для избыточной энергии рекуперации электротранспорта на сегодня остается открытым и требует более глубокого изучения.

### Выводы

Электротранспорт в режиме рекуперации генерирует в контактную сеть нестабильную энергию (в т.ч. импульсного характера), передача которой во внешнюю систему электроснабжения может вносить в нее искажения виде низкочастотной модуляции ока сети. Стабилизация рекуперированной энергии требует применения либо накопителей на ЭПС, либо усовершенствование системы автоматического регулирования рекуперативного торможения. Дополнительных исследований требует возможные ущербы от искажения показателей качества энергии в системе внешнего электроснабжения рекуперации в нее энергии торможения.

Для повышения эффективности использования потенциала энергосбережения от применения рекуперации энергии в системе электрической тяги необходима разработка на современной научной базе новых принципов функционирования СТЭ с учетом свойств как ЭПС так и СТЭ, что представляет собой решение сложной комплексной задачи согласования между собой множества непрерывно изменяющихся параметров. Перспективным технологическим направлением в этой области является развитие методов и средств оперативного (ситуационного) управления режимами СТЭ, в первую очередь ситуационное управление режимами напряжения при рекуперации в условиях ограниченного тягового электропотребления, для чего необходимы теоретические и экспериментальные исследования.

### Библиографический список

1. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги: учебник для вузов [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров – М.: Транспорт, 1995. – 328 с.
2. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман – Д.: Изд-во Маковецкий, 2011. Т. 1. – 456 с.
3. Сулима, С. Д. Повышение эффективности рекуперативного торможения электровозов постоянного тока: дис. канд. техн. наук: 05.22.09 / Сулима Станислав Дмитриевич. – Дн-вск, 2001. – 189 с.
4. Тарута, П. В. Повышение эффективности использования энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения постоянного тока: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Тарута Павел Викторович. – Омск, 2004. – 164 с.
5. Сидорова, Н. Н. Энергоемкость перевозочного процесса в электрической тяге поездов и обоснование путей энергосбережения: дис. докт. техн. наук: 05.22.07 / Сидорова Наталья Николаевна. – М., 2001. – 286 с.
6. Саблин, О. И. Анализ качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического транспорта [Текст] / О. И. Саблин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – Вип. 38. – С. 186-189.
7. Czuchra, W. Ocena energochłonności tramwajów z napędem asynchronicznym / W. Czuchra, J. Prusak, W. Zajac // 7th International Conference «Modern Electric Transport in Integrated XXI st Century Europe», Poland, Warsaw, 2005. – P. 160-164.
8. Кузнецов, В. Г. Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог [Текст] / В. Г. Кузнецов, Р. С. Мыцко, Д. А. Босый // Вісник ДНУЗТ. – 2007. – Вип. 18. – С. 34-37.

**Ключові слова:** электротранспорт, тягове електроспоживання, електричне гальмування, рекуперація, енергозбереження.

**Ключевые слова:** электротранспорт, тяговое электропотребление, электрическое торможение, рекуперация, энергосбережение.

**Keywords:** electric transport, tractive power consumption, electric braking, recuperation, energy saving.

Поступила в редколлегию 25.11.2013