

**О. И. САБЛИН**, канд. техн. наук, доц., Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

## **АНАЛИЗ КАЧЕСТВА РЕКУПЕРИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА**

Рассмотрены и определены показатели качества энергии рекуперации в системе электротранспорта постоянного тока. Установлено что в условиях реальной эксплуатации электротранспорта величины этих показателей существенно отличаются от оптимальных значений. В работе намечены пути улучшения качества рекуперированной электроэнергии.

**Ключевые слова:** электротранспорт; рекуперативное торможение; электроэнергия; показатели качества; энергоэффективность.

**Введение.** Одним из существенных преимуществ электрического транспорта перед другими видами транспорта является возможность применения на нем рекуперации, позволяющей сократить расход электроэнергии на тягу по разным оценкам от 10 до 30 % [1, 2], что в первую очередь зависит от вида электротранспорта (метро, трамваи, троллейбусы, электропоезда, электровозы) и рельефа местности. Кроме экономии электроэнергии, рекуперация позволяет плавно регулировать тормозную силу вплоть до остановки транспортного средства, сокращает износ элементов основного тормозного оборудования (пневматического), а также улучшает экологический фактор. Однако с точки зрения энергоэффективности рекуперация в энергосистеме электрической тяги зависит от влияния различных негативных факторов, которые не позволяют в полной мере использовать ее потенциал. К ним в первую очередь следует отнести:

–отсутствие поездов на линии в режиме тяги, что приводит к образованию избыточной энергии рекуперации и ее недоиспользованию;

– нестабильность энергии рекуперации, вызванная множеством случайных факторов, таких как необходимый режим торможения, режимы работы других поездов на линии, качество системы автоматического управления рекуперативным торможением и т.д.

Указанные факторы осложняют функционирование системы тягового электроснабжения и первичной энергосистемы. Первый недостаток пытаются устранять разработкой графиков движения поездов с учетом совпадения на одном участке рекуперированных и потребляющих поездов. На тяговых подстанциях оборудованных инверторами при отсутствии тяговых потребителей существует возможность возврата избыточной энергии рекуперации в первичную энергосистему, однако ввиду нестабильности и ненадлежащего качества этой энергии ее существенная часть теряется, а также вносит искажения в первичную сеть [3]. Второй недостаток устраняют совершенствованием систем автоматического управления режимом рекуперации электроподвижного состава, однако ввиду специфики режимов электродинамического торможения этот недостаток будет сохранен.

**Цель работы.** Целью данной работы является оценить качество электрической энергии рекуперативного торможения электротранспорта постоянного тока в

условиях реальной эксплуатации.

**Теоретические предпосылки.** Система электрической тяги для первичной энергосистемы представляет собой существенную резкопеременную импульсную нагрузку, что связано с

регулированием мощности тяговых средств, а также с графиком их движения. На рис. представлены графики нагрузки некоторых единиц электротранспорта постоянного тока в одном из режимов их работы, где мгновенная мощность  $p > 0$  соответствует тяговому режиму,  $p < 0$  режиму рекуперации, а  $p \approx 0$  соответственно остановке или режиму выбега.

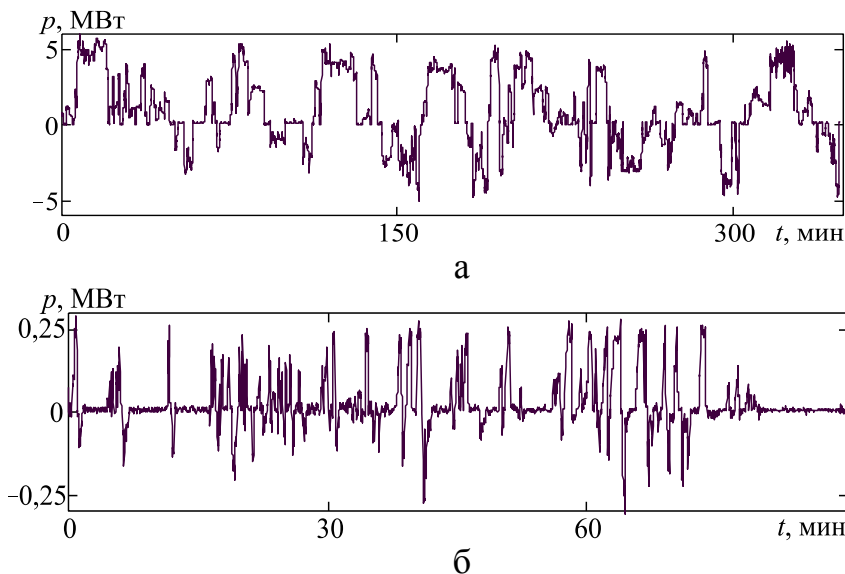


Рис. – Временные диаграммы мощности электровоза ВЛ8: а – и вагона трамвая ТЗД, б – в одном из режимов работы

**Методика расчетов.** По известным графикам мощности  $p(t)$  транспортных средств (рис.) были определены расход электроэнергии на тягу и энергия от рекуперативного торможения за рассматриваемые интервалы времени  $T$  согласно выражению

$$W = \int_0^T p(t) dt . \quad (1)$$

Для электровоза ВЛ8 расход на тягу в рассматриваемом режиме составил 9032 кВт·ч при рекуперации 3270 кВт·ч, что составляет 36 % от затрат на тягу. У трамвая ТЗД потребление 54 кВт·ч, а рекуперация 16,5 кВт·ч, т.е. 30 % от затраты.

Как видно из рис. 1 генерируемая мощность рекуперации неравномерная и подвержена значительным колебаниям, т.е. в реальных условиях эксплуатации представляет собой преимущественно случайный процесс, зависящий от множества факторов. Оценка качества рекуперированной энергии наряду с классическими показателями требует использования специфических количественных оценок, учитывающих неравномерность генерируемой рекуперативной мощности.

В качестве одного из показателей оценки энергетической эффективности рекуперированной энергии можно рассматривать так называемый «пик-фактор» [4], представляющий собой отношение максимальной мощности рекуперации в пределах одного торможения к средней мощности рекуперации в пределах того же торможения

$$\Pi = \frac{P_{\max}}{P_{\text{cp}}} = \frac{P_{\max}}{\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt} . \quad (2)$$

Этот показатель можно интерпретировать как критерий равномерности рекуперации, за количественную оценку которой также может быть принята величина относительного колебания потока энергии рекуперации – величина энергии, которая колеблется около уровня ее среднего значения

$$W_{\sim} = \int_0^T |p(t) - P_{cp}| dt. \quad (3)$$

Таким образом, минимум потерь энергии рекуперации согласно (2) и (3) достигается при  $\Pi \rightarrow 1$  и соответственно  $|p(t) - P_{cp}|_{\max} \rightarrow \min$ , т.е. в случае максимальной стабилизации генерируемой мощности.

Потери электроэнергии при неравномерном потреблении (генерировании) количественно считаются пропорциональными квадрату коэффициента формы [4], который можно определить как отношение действующего значения мощности рекуперации к ее среднему значению

$$K_{\phi} = \frac{P_d}{P_{cp}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt}. \quad (4)$$

По аналогии с коэффициентом гармоник для сетей промышленной частоты, который определяют по выражению [4]

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{50} P^{(k)2}}}{P^{(1)}}, \quad (5)$$

с целью анализа уровня искаженности рекуперированной мощности можно ввести в рассмотрение коэффициент гармоник энергии рекуперации, где мощность основной гармоники  $P^{(1)}$  согласно (5) заменим мощностью нулевой гармоники (постоянной составляющей), а высшие гармоники для системы электрической тяги постоянного тока начинаются с  $k = 1$  (переменные составляющие). Тогда (5) принимает вид

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} P^{(k)2}}}{P_{cp}}, \quad (6)$$

и физически характеризует долю переменной составляющей энергии рекуперации в ее полной энергии. Очевидно, что минимум потерь энергии рекуперации будет при  $K_{\Gamma} \rightarrow 0$ .

Величины показателей  $K_{\phi}$  и  $\Pi$  могут определяться непосредственно по известной зависимости  $p(t)$  аналитически, приближенно либо после разложения  $p(t)$  в ряд Фурье, а  $K_{\Gamma}$  только после разложения  $p(t)$  в ряд Фурье. Необходимо отметить, что все перечисленные показатели линейно связаны одной целевой функцией – минимум потерь энергии рекуперации достигается при  $p(t) \rightarrow \text{const}$ , т.е. при максимальной стабилизации мощности рекуперации, поэтому улучшение любого из показателей приведет к улучшению остальных.

**Обсуждение результатов.** По приведенным выражениям (2), (4) и (6) были рассчитаны основные вероятностные характеристики рассмотренных оценок эффективности энергии рекуперации, которые сведены в табл.

Таблица – Основные вероятностные характеристики рассмотренных оценок эффективности энергии рекуперации

	Пик-фактор $\Pi$				Коэф. формы $K_\phi$				Коэф. гарм. $K_\Gamma$			
	min	max	$m_\Pi$	$\sigma_\Pi$	min	max	$m_{K_\phi}$	$\sigma_{K_\phi}$	min	max	$m_{K_\Gamma}$	$\sigma_{K_\Gamma}$
Электровоз ВЛ8	1,40	7,52	2,57	1,65	1,05	3,72	1,38	0,72	0,30	3,58	0,82	0,86
Трамвай ТЗД	1,19	7,1	2,78	0,62	1,15	2,10	1,61	0,16	0,56	3,60	0,98	0,19

Как следует из расчета (табл.) показатели качества энергии рекуперации в условиях реальной эксплуатации существенно отличаются от своих оптимальных значений, причем показатели трамвая при рекуперации ниже показателей электровоза. Скорее всего, это объясняется тем, что режимы работы городского электротранспорта имеют более выраженный резко переменный импульсный характер, чем у магистрального транспорта, который является более инерционной и равномерной нагрузкой.

**Выводы.** Для сглаживания энергии рекуперации требуется поиск и разработка новых технологических решений, одним из которых может быть продолжение развития и совершенствования систем автоматического управления рекуперативным торможением электротранспорта на основе исследования реальных факторов влияющих на рекуперацию.

**Список литературы:** 1. Корниенко, В. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. Аналитический обзор [Текст] / В. В. Корниенко, А. В. Котельников, В. Т. Доманский – К.: Транспорт Украины, 2004. – 196 с. 2. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман – Д.: Изд-во Маковецкий, 2011. Т. 1. – 456 с. 3. 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. 4. Жежеленко, І. В. Електромагнітна сумісність в системах електропостачання [Текст] / І. В. Жежеленко, А. К. Шидловський, Г. Г. Півняк, Ю. Л. Сасенко – Д.: Вид-во НГУ, 2009. – 305 с.

Поступила в редколлегию 02.06.2013

УДК 629.423.1

**Анализ качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического транспорта/ Саблин О. И.** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП», – 2013. - № 38 (1011). – С.186-189. – Бібліогр.: 4 назв.

Розглянуто та визначено показники якості енергії рекуперації в системі електротранспорту постійного струму. Встановлено, що в умовах реальної експлуатації електротранспорту величини цих показників істотно відрізняються від оптимальних значень. В роботі окреслені шляхи покращення якості електроенергії що рекуперується.

**Ключові слова:** електротранспорт; рекуперативне гальмування; електроенергія; показники якості; енергоефективність.

The paper discusses and determines the quality of energy recovery in the system of electric DC. It is established that in conditions of real operation of the electric values of these parameters are significantly different from the optimal values. In the work of the ways of improving quality of electric energy recovery.

**Keywords:** electric transport; regenerative braking; electricity; quality indicators; energy efficiency.