

## УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭНЕРГОЕМКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Г.Г.Жемеров<sup>1</sup>, докт.техн.наук, Н.А.Ильина<sup>1</sup>, докт.техн.наук, Д.В.Тугай<sup>2</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> – Национальный технический университет «ХПИ»,

ул. Фрунзе, 21, 61002, Харьков, Украина, e-mail: [zhemerov@gmail.com](mailto:zhemerov@gmail.com)

<sup>2</sup> – Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,  
ул. Революции, 12, Харьков, 61002, Украина.

*Показано, что использование энергоемких накопителей энергии в системах электроснабжения метрополитена позволит не только уменьшить суммарный объем электроэнергии, потребляемой из сети, но и значительно сократить потери энергии при ее передаче и потреблении.* Библ. 5, рис. 2, табл. 1.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, подвижной состав, энергоэффективность, энергия, потери энергии, коэффициент полезного действия, рекуперация, накопитель энергии.

Вопросы повышения энергетической эффективности особенно актуальны для украинских метрополитенов (МП), где по сегодняшний день эксплуатируется подвижной состав с коллекторными двигателями постоянного тока и резистивным торможением, при котором кинетическая энергия движущегося электропоезда рассеивается в виде тепла в тормозных резисторах [2, 3, 5]. По данным метрополитена затраты электроэнергии на питание поездов при такой системе электроснабжения (СЭ) составляют 80-95% от общих затрат электроэнергии [3]. Т.к. параметры аккумуляторов и суперконденсаторов – удельная энергоемкость, допустимое количество циклов заряда-разряда – быстро улучшаются [1, 4] в настоящее время, возможно их эффективное применение в ряде систем электроснабжения.

Электроснабжение электропоездов украинских метрополитенов осуществляется от тяговой контактной сети постоянного тока напряжением 825 V. Контактная сеть питается от подземных или наземных подстанций, которые подключаются к сети 6(10) kV через понижающий трансформатор и неуправляемый шестипульсный выпрямитель. Однонаправленный поток энергии от сети к нагрузке обуславливает значительные суммарные потери энергии в такой СЭ, которые складываются из потерь в устройствах тяговых подстанций  $\Delta E_S$ , контактной сети  $\Delta E_d$ , элементах электропривода  $\Delta E_{ASD}$  и тормозных резисторах  $\Delta E_{BR}$  [2, 3]

$$\Delta E_{\Sigma 1} = \Delta E_S + \Delta E_d + \Delta E_{ASD} + \Delta E_{BR} \quad (1)$$

Альтернативой существующей СЭ подвижного состава метрополитена являются системы электроснабжения, использующие энергоемкие накопители энергии (НЭ). Причем возможны два варианта размещения накопителя – стационарное (на тяговой подстанции) и бортовое (на борту электропоезда), как показано на рис. 1. Схема двунаправленных потоков энергии и потерь энергии для четырех возможных вариантов реализации системы электроснабжения подвижного состава показана на рис. 2.

Выбор того или иного варианта размещения НЭ зависит от сопоставления технико-экономических и эксплуатационных показателей в ходе принятия индивидуальных проектных решений. Оба варианта размещения позволяют сократить суммарную энергию, потребляемую подвижным составом из сети, и уменьшить уровень потерь энергии в элементах СЭ [2]. Уменьшение потребляемой из сети энергии достигается циркуляцией в СЭ двунаправленного энергетического потока, при котором максимальная кинетическая энергия ( $E_{kimax}$ ), накапливаемая электропоездом в момент окончания разгона, не рассеивается в тормозных резисторах, а отправляется в накопитель энергии. Из сети потребляется энергия, необходимая для питания вспомогательного электро-технического оборудования (привод дверей, освещение, вентиляция, связь) ( $E_{tr}$ ), энергия, расходуемая на преодоление сопротивления воздуха в туннеле и трения колесной базы ( $E_{move}$ ), и энергия, эквивалентная потерям в элементах СЭ ( $\Delta E_{\Sigma}$ ).

В случае размещения НЭ на тяговой подстанции суммарные потери энергии в СЭ

$$\Delta E_{\Sigma 2} = \Delta E_{S+} + \Delta E_{d+} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d-} + \Delta E_{ASD-} + \Delta E_{ES1} \quad (2)$$

где  $\Delta E_{d-}$ ,  $E_{ASD-}$  – приведенные потери энергии в контактной сети и элементах электропривода при обратном потоке из нагрузки в НЭ;  $\Delta E_{ES1}$  – потери в накопителе энергии.

При бортовом размещении НЭ суммарные потери энергии уменьшатся на величину  $\Delta E_d$ .

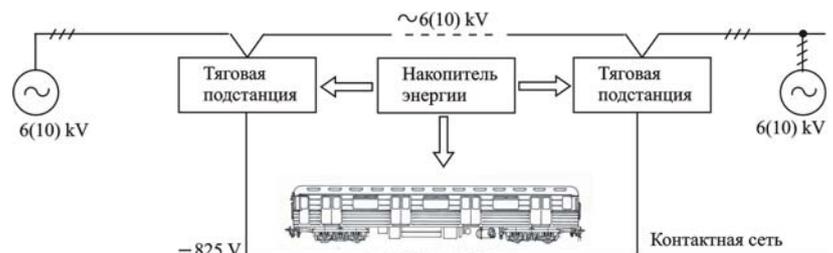


Рис. 1

$$\Delta E_{\Sigma 3} = \Delta E_{S+} + \Delta E_{d+} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{ASD-} + \Delta E_{ES1}. \quad (3)$$

Возможен вариант использования бортового накопителя энергии в бесконтактной СЭ. Массогабаритные характеристики накопителя в такой системе электроснабжения увеличиваются, однако происходит значительное уменьшение потерь энергии за счет отсутствия контактной сети

$$\Delta E_{\Sigma 4} = \Delta E_{S+} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{ASD-} + \Delta E_{ES2}, \quad (4)$$

где  $\Delta E_{ES2}$  – потери энергии в накопителе при бесконтактной СЭ.

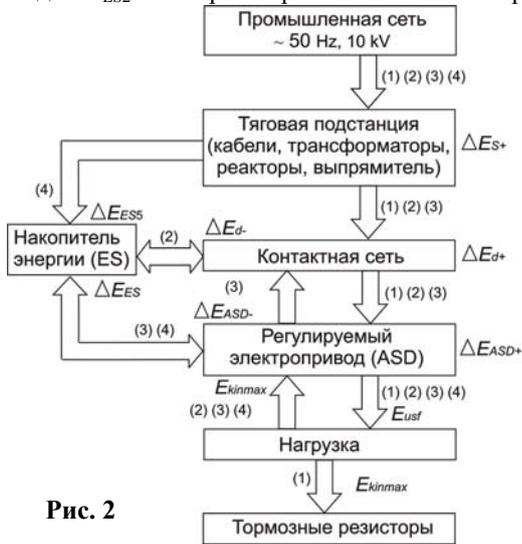


Рис. 2

Суммарный коэффициент полезного действия, учитывающий двунаправленный поток энергии в системе электроснабжения подвижного состава может быть рассчитан по соотношению  $\eta_{\Sigma} = (E_{usf}^* - E_{kinmax}^*)E_S^{*1}$ , где  $E_{usf}^* = E_{kinmax}^* + E_{tr}^* + E_{move}^*$  – относительная полезная энергия,  $E_S^*$  – суммарная относительная энергия, потребляемая из сети.

В таблице представлено сопоставление результатов расчета  $E_S^* = E_S/E_{kinmax}$  – суммарной энергии, потребляемой из сети, и потерь энергии  $\Delta E_{\Sigma}^* = \Delta E_{\Sigma}/E_{kinmax}$  для четырех указанных систем электроснабжения подвижного состава метрополитена относительно традиционной СЭ без накопителя энергии, а также суммарный КПД  $\eta_{\Sigma}$ . При расчете были приняты допущения, что энергия собственных нужд электропоезда составляет 10% от максимума кинетической энергии, а энергия, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха в туннеле и трение, принималась для двух вариантов, соответственно 10% и 20%. Относительные, в долях максимума кинетической энергии, потери в элементах системы электро-

снабжения  $\Delta E_{S+}^* = 0.065$ ,  $\Delta E_{d+}^* = 0.13$ ,  $\Delta E_{ASD+}^* = 0.07$ ,  $\Delta E_{ES1}^* = 0.01$ ,  $\Delta E_{ES2}^* = 0.02$  при  $E_{move}^* = 0.1$  и  $E_{move}^* = 0.2$ .

Тип СЭ	$E_S^* = E_S/E_{kinmax}$		$\Delta E_{\Sigma}^* = \Delta E_{\Sigma}/E_{kinmax}$		$\eta_{\Sigma}$	
	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
Традиционная	1.465	1.565	1.265	1.265	0.137	0.192
Со стационарным НЭ	0.59	0.681	0.39	0.381	0.339	0.441
С бортовым НЭ	0.39	0.496	0.19	0.196	0.512	0.605
Бесконтактная с бортовым НЭ	0.362	0.462	0.162	0.162	0.552	0.649

жени потерь энергии в 3.3–7.8 раза.

Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод, что использование энергоёмких накопителей в системах электроснабжения подвижного состава метрополитена позволит уменьшить потребление энергии из сети в 2.3–3.4 раза при одновременном снижении потерь энергии в 3.3–7.8 раза.

УДК 621.314

## ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЕНЕРГОЄМНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Г.Г.Жемеров<sup>1</sup>, докт.техн.наук, Н.О.Ільїна<sup>1</sup>, докт.техн.наук, Д.В.Тугай<sup>2</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> – Національний технічний університет «ХПІ», вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна, e-mail: [zhemerov@gmail.com](mailto:zhemerov@gmail.com)

<sup>2</sup> – Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, вул. Революції, 12, Харків, 61002, Україна.

Показано, що використання енергоємних накопичувачів енергії в системах електропостачання метрополітену дозволить не тільки зменшити сумарний об'єм електроенергії, що споживається з мережі, але й зменшити втрати енергії при її транспортуванні і споживанні. Бібл. 5, рис. 2, табл. 1.

**Ключові слова:** система електропостачання, рухомий склад, енергоефективність, енергія, втрати енергії, коефіцієнт корисної дії, рекуперація, накопичувач енергії.

## REDUCTION OF ENERGY LOSSES IN SUBWAY ROLLING-STOCK ENERGY SUPPLY SYSTEMS USING ENERGY-CONSUMING STORAGES

G.G.Zhmerov<sup>1</sup>, N.O.Ilyina<sup>1</sup>, D.V.Tugay<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Frunze str., 21, Kharkiv, 61002, Ukraine, [zhemerov@gmail.com](mailto:zhemerov@gmail.com)

<sup>2</sup> – O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Revolution str., 12, Kharkiv, 61002, Ukraine.

It is shown, that the use of energy-intensive energy storage in subway power systems will not only reduce the total amount of electricity consumed from the network, but also will reduce the energy loss during its transportation and consumption. References 5, figures 2, table 1.

**Key words:** power system, rolling-stock, energy efficiency, energy, energy loss, recuperation, energy storage.

1. Zhmerov G.G., Ilyina O.V. Energy Storage pulsation instantaneous active power // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychni vypusk "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist". – 2007. – Part 3. – Pp. 23–28. (Rus)

2. Zhmerov G.G., Ilyina N.A., Tugay D.V., Khold O.I. Subway power supply systems by contemporary semiconductor converters and energy storage // Elektrotehnika i Elektromekhanika. – 2013. – № 1. – Pp. 41–49. (Rus)

3. Zhmerov G.G., Khold O.I. Ways to modernize subway power supply systems // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychni vypusk "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist". – 2012. Part 1. – Pp. 27–35. (Rus)

4. Shaqaryan J.G. Prospects of energy storage in the UNEG and UES of Russia // Vesti v elektroenerhetike. – 2010. – № 4. – Pp. 16–22. (Rus)

5. <http://www.metro.kharkov.ua>

Надійшла 17.02.2014