

УДК 621.3/629.4:620.9

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.110971>

АНАЛІЗ ПИТАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ НА РУХОМОМУ СКЛАДІ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Канд. техн. наук А. О. Сулим

АНАЛИЗ ВОПРОСА ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ НА ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

Канд. техн. наук А. А. Сулим

ANALYSIS OF ENERGY STORAGE IMPLEMENTATION ON THE METRO ROLLING STOCK

Candidate of Engineering Sciences A. Sulym

У статті за результатами аналізу існуючих досліджень визначено, що в метрополітені найбільш перспективними є електромеханічні, індуктивні, ємнісні та електромеханічні (інерційні) накопичувачі енергії. Виконано порівняльний аналіз зазначених накопичувачів за різними критеріями оцінки. За результатами аналізу встановлено, що в кожного перспективного накопичувача присутні переваги і недоліки. Подальші дослідження необхідно направити на обґрунтування раціонального типу бортового накопичувача в метрополітені.

Ключові слова: накопичувач енергії, рухомий склад метрополітену, система енергозабезпечення метрополітену.

В статье по результатам анализа существующих исследований определено, что в метрополитене наиболее перспективными являются электромеханические, индуктивные, емкостные и электромеханические (инерционные) накопители энергии. Выполнен сравнительный анализ обозначенных накопителей по различным критериям оценки. По результатам анализа установлено, что каждому перспективному накопителю присущи

достоинства и недостатки. Дальнейшие исследования необходимо направить на обоснование рационального типа бортового накопителя в метрополитене.

Ключевые слова: накопитель энергии, подвижной состав метрополитена, система энергообеспечения метрополитена.

The application of various types of energy storages in the power supply system of metro is analyzed. The analysis of existing research determined that most prospects in the metro are electrochemical, inductive, capacitive and electromechanical (inertial) energy storages. A comparative analysis of these energy storages was carried out for power, temporal, technical, operational, economic indicators. In addition, the estimation of prospective energy storages on the following criteria was carried out: ecological compatibility, noise, manufacturing technology, the stability characteristics of charge and discharge to temperature changes. The evaluation and comparative analysis found that each of the considered energy storage has advantages and disadvantages. So it is impossible to answer which of the following types of energy storages is the most rational. Therefore, further research should be directed to developing a comprehensive approach to identify the most rational one among these types of energy storages for its placing on the metro rolling stock.

Key words: energy storage, underground rolling stock, the power supply system.

Вступ. Енергоресурси в більшості визначають економічну ситуацію в сучасному світі. Для всіх розвинутих країн вирішення проблем енергозбереження та енергоефективності стало одним з пріоритетних напрямків діяльності. Для багатьох сучасних підприємств зниження енергоемності та енергетичної складової собівартості продукції також є одним з визначальних факторів ефективного розвитку [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У дослідженнях [2, 3] для вирішення зазначених проблем запропоновано використання накопичувачів енергії. Застосування накопичувачів дає можливість комплексно вирішити ряд завдань. У якості основних можна виділити такі [2, 4]:

- зменшення споживання електроенергії з мережі за рахунок акумуляування та буферизації надлишкової енергії;

- спрямлення хвилинних і годинних графіків споживання електроенергії, внаслідок чого забезпечується статична і динамічна стійкість енергосистеми;

- стабілізація рівня напруги в мережі та підвищення якості електроенергії;

- зниження встановленої потужності силових установок, що здійснюють подачу

та перетворення електроенергії до споживачів (трансформатори, перетворювачі, розподільні підстанції тощо);

- можливість енергозабезпечення споживачів зі змінним графіком навантаження при незмінному навантаженні джерела живлення;

- можливість зменшення струмових навантажень і відповідно температури нагріву силових агрегатів, що дозволить підвищити їх термін служби;

- забезпечення безперебійного енергопостачання під час аварійних режимів роботи основних джерел живлення.

Одним з перспективних напрямків застосування накопичувачів енергії є залізничний транспорт з різко змінним навантаженням, зокрема метрополітен [1, 5-11]. Основною перевагою їх застосування в метрополітені є особливість експлуатації його рухомого складу: чітко виражений імпульсний нерівномірний характер навантаження, незначні відстані між станціями, як наслідок, часті пуски та гальмування; часто змінюваний профіль колії; необхідність частого розгону та гальмування внаслідок зміни обмежень швидкості для різних ділянок колії; стабільний графік руху порівняно з іншими

видами залізничного транспорту (маневрових тепловозів, магістральних електровозів, трамваїв) [10, 11].

Відомо, що основну частину енергетичних витрат у метрополітені складають витрати на тягу (близько 70 %) [10, 12, 13]. З метою зменшення споживання електроенергії на тягу метрополітени України закуповують нові та виконують модернізацію існуючих вагонів, що вичерпали свій термін експлуатації, з можливістю генерації електроенергії до контактної мережі в режимі рекуперативного гальмування. З аналізу досліджень [1, 8, 10, 14] встановлено, що ефективність використання електроенергії рекуперативного гальмування залежить від багатьох факторів. Серед основних можна виділити інтенсивність руху в зоні рекуперації, режим руху інших споживачів електроенергії, відстань між станціями та профіль колії. Як наслідок, використання електроенергії рекуперативного гальмування має ймовірнісний характер і дозволяє заощадити на рівні 5-10 % електроенергії, що споживається на тягу рухомого складу [6, 10].

Однак забезпечити повторне використання електроенергії рекуперативного гальмування з максимальною ефективністю без застосування додаткових технічних засобів, зокрема накопичувачів енергії, неможливо [1, 5, 6, 10, 14]. Ефективність використання електроенергії рекуперативного гальмування і термін окупності додаткових технічних засобів переважно залежать від вибору місця розташування накопичувачів енергії в системі енергозабезпечення метрополітену. Зазначене питання розглядається в численних дослідженнях [1, 5, 6, 10, 14, 15]. З аналізу електричних принципових схем та існуючих досліджень [1, 10, 16-18] відомо, що в метрополітені накопичувачі енергії можна розміщувати перед тяговою підстанцією, безпосередньо на тяговій підстанції, на постах секціонування, на виході тягової підстанції вздовж лінії

контактної мережі (на станціях, на кінцях консольних ділянок тягової мережі), на рухомому складі. На основі виконаного узагальненого аналізу існуючих досліджень і їх порівняльного аналізу встановлено, що в метрополітені найбільш раціональним є бортове розміщення накопичувачів енергії (на рухомому складі метрополітену).

Ще одним важливим фактором, від якого напряму залежить термін окупності системи накопичення в цілому, є правильний вибір типу накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену. Аналіз існуючих досліджень [1, 5, 10, 14] дозволив встановити, що дане питання досить актуальне та недостатньо вивчене. Виходячи з цього дана стаття присвячена аналізу питання застосування перспективних накопичувачів енергії на рухомому складі метрополітену.

Мета статті. Визначення перспективних накопичувачів енергії для умов розміщення на рухомому складі метрополітену та їх порівняльний аналіз.

Основна частина дослідження. Огляд численних досліджень [1-3, 10, 14] свідчить, що існують різні типи накопичувачів енергії. Із робіт [2, 3, 10, 19, 20] відомо, що накопичувачі енергії класифікуються за різними ознаками: за фізичним принципом дії, способом компенсації, способом регулювання, місцем розміщення тощо. В існуючих дослідженнях найбільше використовують класифікацію накопичувачів енергії за фізичним принципом [1-3, 10, 14, 21]. За даною класифікацією, основними типами накопичувачів є електрохімічні, індуктивні, ємнісні, механічні, електромеханічні, електродинамічні, пневматичні, гідро- та повітряокумулюючі накопичувачі [1-3, 17, 22]. Аналіз попередніх досліджень [1, 5, 6, 10, 14, 21, 23-27] дозволив встановити, що на залізничному транспорті з різкозмінним навантаженням, зокрема в метрополітені, найбільшу перспективу мають електрохімічні (ЕХН), індуктивні (ІН), ємнісні (ЄН) та електромеханічні

накопичувачі (ЕМН). Тому в подальшому розглядаються саме зазначені перспективні типи накопичувачів енергії.

Слід зазначити, що обґрунтування раціонального типу накопичувача енергії необхідно виконувати з урахуванням умов експлуатації рухомого складу метрополітену та порівняльного аналізу характеристик зазначених перспективних накопичувачів енергії.

Система енергозабезпечення (СЕ) метрополітенів є потужним та енергоємним споживачем електроенергії першої

категорії. Крім того, СЕ метрополітену є споживачем з нерівномірним графіком енергоспоживання. Нерівномірність споживання в СЕ обумовлена зміною добового графіка руху поїздів та імпульсним характером навантаження. Діаграма споживання струму з контактної мережі під час експлуатації рухомого складу метрополітену в штатному режимі на середньостатистичному перегоні, отримана експериментально за допомогою випробувального комплексу, наведена на рисунку.

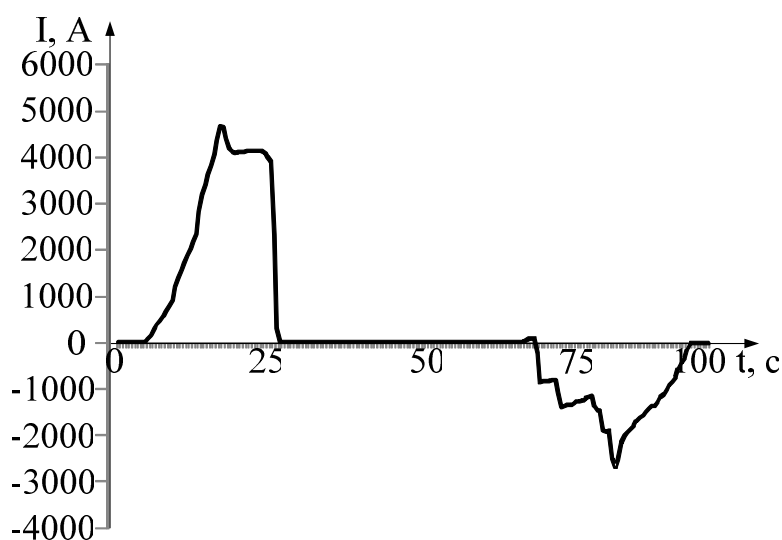


Рис. Діаграма споживання струму рухомим складом метрополітену

Тому при обґрунтуванні вибору раціонального типу накопичувача необхідно враховувати вказані вище фактори. Слід зазначити, що, окрім урахування графіка руху та імпульсного характеру навантаження поїздів метрополітену, необхідно виконувати порівняльний аналіз показників (характеристик) зазначених типів накопичувачів за різними критеріями оцінки [10]. У роботах [21, 28] запропоновано порівняльний аналіз різних типів накопичувачів здійснювати за їхніми енергетичними, часовими, технічними, експлуатаційними та економічними показниками.

За дослідженням [28], до основних енергетичних показників слід віднести технічну оптимальну енергоємність накопичувача, мінімальну та максимальну енергоємність, питому енергоємність або густину енергії, мінімальну та максимальну потужність, питому потужність або густину потужності; до часових показників – час збереження енергії, час заряджання/розряджання накопичувача; до технічних показників – коефіцієнт корисної дії (ККД) накопичувача, кількість циклів заряджання і розряджання, до експлуатаційних показників – термін служби (ресурс) накопичувача, діапазон робочих температур; до економічних

показників – питомі капіталовкладення на одиницю енергоємності, питомі капіталовкладення на одиницю потужності, питомі експлуатаційні витрати. Показники технічної оптимальної енергоємності накопичувача, мінімальної та максимальної енергоємності, мінімальної та максимальної потужності, характеристики заряджання та розряджання накопичувача значною мірою залежать від умов експлуатації рухомого складу на прикладі конкретної лінії метрополітену та застосування конкретного типу накопичувача енергії, що є окремим напрямком досліджень, тому в даній роботі при здійсненні порівняльного аналізу перелічені показники не розглядаються. Крім того, додатково виконувався

порівняльний аналіз накопичувачів за такими показниками: екологічність, шумність, технологія виготовлення, стійкість характеристик заряджання та розряджання до зміни температури.

Для умов метрополітену обґрунтування раціонального типу бортових накопичувачів повинно виконуватись виходячи з таких вимог, які наведено в табл. 1. Слід зазначити, що на сьогодні нормативної документації, у якій було б сформульовано вимоги до бортових накопичувачів енергії в метрополітені, не існує. Тому вимоги, зазначені в табл. 1, мають довідково-рекомендаційний характер. У табл. 2-3 наведено порівняльний аналіз ЕХН, ІН, СН, ЕМН за вищеперерахованими показниками.

Таблиця 1

Вимоги до параметрів бортових накопичувачів енергії для умов метрополітену

Параметр	Вимоги
Питома енергоємність, Вт·год/кг	≥ 10
Питома потужність, кВт/кг	≥ 5
Час збереження енергії, год	0...24
Час заряджання/розряджання енергії, с	0...300
Коефіцієнт корисної дії, %	≥ 85
Кількість циклів заряджання/розряджання	$\geq 10^6$
Термін служби, р.	≥ 20
Діапазон робочих температур, °С	-40...+50
Питомі капіталовкладення на одиницю енергоємності, дол./кВт·год	≤ 1000
Питомі капіталовкладення на одиницю потужності, дол./кВт	≤ 700
Питомі загальні витрати, дол./рік *	$\leq 2,5 \cdot 10^4$
Екологічність	Нетоксичні, безпечні
Шумність	Малошумні (не збільшують рівень фону при роботі на поїзді)
Технологія виготовлення	Проста, серійна
Стійкість характеристик заряджання та розряджання до зміни температури	Стійкі

*Примітка. Вимоги до питомих загальних витрат наведено для номінальної потужності накопичувача 500 кВт, енергоємності – 10 кВт·год і без урахування витрат на його утилізацію.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз накопичувачів енергії за енергетичними, часовими, технічними та експлуатаційними показниками

Тип накопи- чувача	Енергетичні показники		Часові показники		Технічні показники		Експлуатаційні показники	
	Питома енергоєм- ність, Вт·год/кг	Питома потуж- ність, кВт/кг	Час самороз- рядж., % за місяць	Час заряд./ розрядж. енергії, с	ККД, %	Кількість циклів заряд/розря- д	Термін служби, р.	Діапазон робочих температур, °C
ЕХН:								
- кислотні;	10-60	0,02-0,4	3-20	$1 \cdot 10^5$	70-85	125-1200	2-5	-30...+45
- нікель- кадмієві;	15-80	0,1-1,3	20	$1 \cdot 10^5$	60-80	300-2800	2-15	-40...+60
- натрій- сірчані;	80-160	0,03-0,5	≤ 2	$1 \cdot 10^5$	81-85	800-4000	3-15	-250...+300
- літій-іонні	80-220	0,1-3,0	≤ 5	$1 \cdot 10^5$	80-96	1200-5500	5-15	-30...+60
ІН:								
- традиційні;	0,3-3	0,1-10	250-350	10^{-3} -10	80-90	$\geq 10^5$	≥ 20	-30...+50
- надпровід- ні (СПІН)	3-15	0,1-15	200-300	10^{-2} - 10^2	85-95	$\geq 10^5$	≥ 20	-30...+65
ЄН:								
- традиційні конденса- торні;	0,05-0,2	0,2-15	≤ 65	10^{-4} - 10^{-2}	80-90	$\geq 10^6$	≥ 20	-30...+70
- іоністори (суперкон- денсатори)	1-20	0,2-12	1-300	10^{-3} - 10^2	80-98	$\geq 10^6$	≥ 20	-50...+70
ЕМН:								
- інерційні маховики зі сталі;	0,5-20	0,02-10	300-420	10^{-2} -10	85-97	$\geq 10^6$	≥ 20	-40...+50
- супермахо- вики з ком- позитних матеріалів	100-300	0,5-10	300-380	10^{-2} -10	88-97	$\geq 10^6$	≥ 20	-40...+50

Таким чином, за термін служби 30 років необхідна кількість комплектів кислотних ЕХН складає 9, нікель-кадмієвих – 4, натрій-сірчанних – 4, літій-іонних – 3, інших накопичувачів (ІН, ЄН, ЕМН) – 1.

З даних, наведених у табл. 2-3, видно, що в кожного типу накопичувача енергії є свої переваги і недоліки. Враховуючи вимоги, що висуваються до параметрів накопичувача (табл. 1), можна зазначити таке:

– ЕХН малошумні, можуть запасати значну кількість питомої електроенергії, однак мають малий ресурс, низький ККД, значні масогабаритні показники. Найбільшу перспективу мають літій-іонні ЕХН, оскільки не потребують обслуговування, нетоксичні, більша кількість циклів заряджання/розряджання порівняно з кислотними та лужними. Однак їх вартість на сьогодні залишається достатньо значною;

Таблиця 3

Порівняльний аналіз накопичувачів енергії за економічними показниками, екологічністю, шумністю, технологією виготовлення, стійкістю характеристик заряджання та розряджання до зміни температури

Тип накопичувача	Економічні показники			Екологічність	Шумність	Технологія виготовлення	Стійкість характеристик заряджання та розряджання до зміни температури
	Питомі капіталовкладення на одиницю енергоемності, дол./кВт·год	Питомі капіталовкладення на одиницю потужності, дол./кВт	Питомі загальні витрати, дол./р.*				
ЕХН: - кислотні; - нікель-кадмієві; - натрій-сірчани; - літій-іонні	50-1100 500-2300 230-950 650-5000	50-850 75-1400 1000-2700 400-3800	$1,52 \cdot 10^5$ $7,17 \cdot 10^4$ $1,74 \cdot 10^5$ $1,35 \cdot 10^5$	Небезпечні Токсичні Нетоксичні Нетоксичні	Малошумні Малошумні Малошумні Малошумні	Проста, серійна Проста, серійна Складна, серійна Складна, серійна	Нестійкі Нестійкі Нестійкі Нестійкі
ІН: - традиційні; - надпровідні (СПІН)	120-4300 500-8100	80-1300 1100-3700	$1,47 \cdot 10^4$ $4,97 \cdot 10^4$	Нетоксичні Нетоксичні	Малошумні Малошумні	Проста, серійна Складна, дослідні зразки	Стійкі Стійкі
ЄН: - традиційні конденсаторні; - іоністори (суперконденсатори)	$10^6 - 2 \cdot 10^6$ 85-5700	100-1250 10-650	$6,14 \cdot 10^5$ $0,78 \cdot 10^4$	Нетоксичні Екологічно безпечні	Малошумні Малошумні	Проста, серійна Проста, серійна	Стійкі Стійкі
ЕМН: - інерційні маховики зі сталі; - супермаховики з композитних матеріалів	40-630 350-10200	280-1200 1350-5100	$2,12 \cdot 10^4$ $9,45 \cdot 10^4$	Нетоксичні Нетоксичні	Шумні Шумні	Проста, серійна Складна, дослідні зразки	Стійкі Стійкі

*Примітка. Питомі експлуатаційні витрати розраховано з урахуванням таких прийнятих умов: нормативний термін служби вагонів складає 30 років; вартість обслуговування протягом терміну служби кислотних ЕХН дорівнює їхній купівельній вартості, нікель-кадмієвих – 20 %, натрій-сірчаних – 20 %, літій-іонні, ІН, ЄН не потребують спеціального обслуговування, ЕМН – 50 %.

– ІН, зокрема і СПН, не потребують обслуговування, мають значний ресурс, широкий діапазон робочих температур, високий ККД, нетоксичні, малощумні, однак мають низьку питому енергоємність і значну вартість;

– ЄН не потребують обслуговування, мають значний ресурс, широкий діапазон робочих температур, високий ККД, безпечні, малощумні, порівняно маловартісні, однак мають низьку питому енергоємність. Іоністори мають більшу питому енергоємність порівняно з традиційними конденсаторами;

– ЕМН мають значний ресурс, широкий діапазон робочих температур, мають високу питому енергоємність, нетоксичні, високий ККД, однак мають середні масогабаритні показники, шумні, потребують спеціального обслуговування. Супермаховики мають високий показник питомої енергоємності порівняно з інерційними маховиками зі сталі за рахунок використання композитних матеріалів і специфічної технології виготовлення, однак їх вартість перевищує маховики зі сталі в декілька раз.

Таким чином, з наведеного порівняльного аналізу однозначно відповісти,

який з перспективних накопичувачів є раціональним, неможливо. Тому подальші дослідження пропонується направити на розроблення комплексного підходу щодо визначення раціонального типу накопичувача за умови його розміщення на рухомому складі метрополітену.

Висновки. На основі виконаного узагальненого аналізу існуючих досліджень встановлено таке:

1. Перспективними накопичувачами енергії на залізничному транспорті, зокрема для умов розміщення на рухомому складі метрополітену, є електрохімічні, індуктивні, ємнісні та електромеханічні (інерційні).

2. У кожного перспективного накопичувача енергії є свої переваги та недоліки, тому однозначно відповісти на питання раціонального типу накопичувача для умов його розміщення на рухомому складі метрополітену неможливо. Отже, подальші дослідження необхідно направити на розроблення комплексного підходу, який дозволить виконати обґрунтування раціонального типу накопичувача енергії за різними критеріями, враховуючи при цьому умови експлуатації рухомого складу в метрополітені.

Список використаних джерел

1. Шевлюгин, М. В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии [Текст]: автореф. дисс... д-ра техн. наук: 05.09.03 / Шевлюгин Максим Валерьевич; Московский гос. ун-т путей сообщения. – М., 2013. – 49 с.
2. Накопители энергии [Текст]: учеб. пособие для вузов / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин [и др.]; под ред. Д.А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
3. Астахов, Ю. Н. Накопители энергии в электрических системах [Текст]: учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов / Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, А.Г. Тер-Газарян. – М.: Высш. школа, 1989. – 159 с.
4. Рыбалко, А. Я. Выбор емкости накопителя энергии для обеспечения снижения максимума потребляемой мощности [Текст] / А.Я. Рыбалко, С.В. Дыбрин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 8. – С. 356-361.
5. Жемеров, Г. Г. Системы электроснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии [Текст] / Г.Г. Жемеров,

Н.А. Ильина, Д.В. Тугай, О.И. Холод // Электротехника і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 1. – С. 41-49.

6. Бычкова, М. П. Энергосбережение в метро [Текст] / М.П. Бычкова // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – Спец. вып. «Наука и транспорт. Метрополитены будущего». – С. 67.

7. Щуров, Н. И. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги [Текст] / Н.И. Щуров, К.В. Щеглов, А.А. Штанг // Сб. науч. трудов НГТУ. – Новосибирск, 2008. – Вып. № 1 (51). – С. 99–104.

8. Саблін, О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену [Текст] / О.І. Саблін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Вып. 8 (72). – Т. 6. – С. 9-13.

9. Колб, А. А. Аккумуляирование энергии рекуперации электрифицированного транспорта с помощью емкостных энергонакопителей [Текст] / А.А. Колб // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 31. – С. 89-94.

10. Сулим, А. А. Повышение эффективности энергообеспечения подвижного состава метрополитена с системами рекуперации путем применения емкостных накопителей энергии [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.22.07 / Сулим Андрей Александрович; Гос. предприятие «Гос. научн. иссл. центр ж.-д. трансп. Украины». – К., 2015. – 188 с.

11. Родькин, Д. И. Особенности осуществления электропривода с накопителями энергии [Текст] / Д.И. Родькин, Т.В. Величко // Наукові праці Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. – Кременчук: КДПУ, 2000. – Вип. 2/2000 (9). – С. 124-132.

12. Шевлюгин, М. В. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии [Текст] / М.В. Шевлюгин, К.С. Желтов // НТТ – Наука и техника транспорта. – 2008. – № 1. – С. 15-20.

13. Омеляненко, Г. В. Электромеханический преобразователь энергии инерционного накопителя для сетей тягового электроснабжения [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.09.01 / Омеляненко Галина Викторовна; Харьковский гос. политехн. ун-т. – Харьков, 1999. – 169 с.

14. Костин, Н. А. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока [Текст] / Н.А. Костин, А.В. Никитенко // Залізничний транспорт України. – 2014. – № 3. – С. 15–23.

15. Sulym, A. Determination of rational placement for energy storages in the power supply system of the underground [Текст] / A. Sulym // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – No 10. – P. 24–30.

16. Штанг, А. А. Применение накопителей энергии в системах электроснабжения городского электрического транспорта [Текст] / А.А. Штанг, Е.А. Спиридонов, М.В. Ярославцев // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 3-4 (40-41). – С. 68-70.

17. Клинов, В. Ю. Емкостные накопители в системе электроснабжения метрополитена [Текст] / В.Ю. Клинов, Ю.А. Бродский, А.И. Подаруев [и др.] // Русский инженер. – 2008. – № 2 (17). – С. 62–64.

18. Шевлюгин, М. В. Повышение энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения железных дорог с помощью накопителей энергии [Текст] / М.В. Шевлюгин // Наука и техника транспорта. – 2007. – № 1. – С. 68-72.

19. Накопители-компенсаторы в системах динамического нагружения [Текст] / Д.И. Родькин, А.В. Бялобжеский, С.А. Кривонос [и др.] // Вісник Харк. держ. політехн. ун-ту. Зб. наук. праць. – Харків: ХДПУ, 2001. – Темат. випуск 63. – С. 279-281.

20. Ломонос, А. И. Параметры оборудования систем динамического нагружения с накопителями-компенсаторами [Текст] / А.И. Ломонос, А.В. Бялобрыжеский, С.Н. Горбань // Вісник КДПУ. – Кременчук, 2004. – Вип. 2/2004 (25). – С. 126-130.
21. Любарский, Б. Г. Сравнительный анализ накопителей энергии для транспортных средств [Текст] / Б.Г. Любарский, В.П. Шайда, С.Г. Буряковский // Залізничний транспорт України. – 2015. – № 6. – С. 13–21.
22. Алексеев, Б. А. Применение накопителей в электроэнергетике [Текст] / Б.А. Алексеев // Електро. – 2005. – № 1. – С. 42-46.
23. Черемисин, В. Т. Выбор мест установки накопителей электроэнергии на полигоне постоянного тока по критерию энергоэффективности [Текст] / В.Т. Черемисин, М.М. Никифоров, В.Л. Незевак // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. – 2013. – № 2(6). – С. 48-52.
24. Устенко, А. В. Использование накопителей энергии для улучшения параметров локомотивов [Текст] / А.В. Устенко, О.В. Пасько // Локомотив-інформ. – 2012. – № 10. – С. 4-6.
25. Омеляненко, В. И. Работа бортового электромеханического инерционного накопителя энергии в тяговом приводе пригородного электропоезда [Текст] / В.И. Омеляненко Л.В. Оверьянова // Залізничний транспорт України. – 2015. – № 1. – С. 44-49.
26. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии [Текст] / В.Т. Черемисин, В.Л. Незевак, А.П. Шатохин // Известия Томского университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – № 10 (326). – С. 54-64.
27. Teymourfar, R. Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line [Текст] / R. Teymourfar, B. Asaei, H. Iman-Eini, R. Nejati fard // Energy Conversion and Management. – 2012. – Vol. 56. – P. 206-214.
28. Рыбалко, А. Я. Критерии сопоставления накопителей энергии [Текст] / А.Я. Рыбалко, С.В. Дыбрин // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2005. – № 75. – С. 56-61.

Сулим Андрій Олександрович, канд. техн. наук, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії електротехнічних, динамічних, теплотехнічних та міцнісних досліджень залізничної техніки Державного підприємства «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», м. Кременчук. Тел. (05366)6-20-43. E-mail: sulim1.ua@gmail.com.

Sulym Andrii, candidate of Engineering Sciences, senior research associate the research laboratory of electrotechnical, dynamic, thermotechnical and strength research of railway vehicles of the State Enterprise “Ukrainian Research Railway Car Building Institute”, Kremenchug. Tel.(05366)6-20-43. E-mail: sulim1.ua@gmail.com.

Стаття прийнята 09.04.2017 р.