

С. В. Дибрін, О. В. Толстов, А. О. Буряк
(Україна, Дніпро, Державний ВНЗ "Національний гірничий університет")

ВИБІР ТИПУ АКУМУЛЮЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЧИСЛА ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Анотація. Запропоновано провадити аналіз і вибір перспективних вторинних джерел енергії для шахтного безконтактного транспорту на прикладі існуючих рішень для автомобільного транспорту. Виявлено, що найбільші компанії-виробники гібридних автомобілів найчастіше обирають нікель-металогідридні та літій-йонні типи акумуляюючих елементів гібридної силової установки. Встановлено також, що світові виробники виявляють все більший інтерес до такого типу накопичувача енергії, як йоністор (суперконденсатор). Існуючі переваги дозволяють вважати суперконденсатор одним з найбільш перспективних автономних джерел додаткового живлення на рудниковому безконтактному електровозі для вирівнювання графіка навантаження тягової перетворювальної підстанції та можливості збільшення числа експлуатованих на горизонті електровозів.

Ключові слова: рудниковий безконтактний електровоз, вторинні джерела енергії, вирівнювання графіка навантаження.

Аннотація. Предложено осуществлять анализ и выбор перспективных вторичных источников энергии для шахтного бесконтактного транспорта на примере существующих решений для автомобильного транспорта. Выявлено, что крупнейшие компании-производители гибридных автомобилей чаще всего выбирают никель-металлогидридные и литий-ионные типы аккумулирующих элементов гибридной силовой установки. Установлено также, что мировые производители проявляют все больший интерес к такому типу накопителя энергии, как ионистор (суперконденсатор). Существующие преимущества позволяют считать суперконденсатор одним из самых перспективных автономных источников дополнительного питания на рудниковом бесконтактном электровозе для выравнивания графика нагрузки тяговой преобразовательной подстанции и возможности увеличения числа эксплуатируемых на горизонте электровозов.

Ключевые слова: рудничный бесконтактный электровоз, вторичные источники энергии, выравнивание графика нагрузки.

Abstract. The sources of electric power in hybrid motor transport are analyzed. It is established that nickel-metal hydride and lithium-ion batteries are most often used, thus interest in supercapacitors is increasing. Supercapacitors have advantages that allow to effectively increase the number of non-contact electric locomotives operating on the horizon.

Key words: mine non-contact electric locomotive, secondary energy sources, load curve alignment.

Постановка проблеми. Завдання можливості збільшення числа експлуатованих на горизонті електровозів (В14-900) шахтного безконтактного транспорту за незмінних інших умов пов'язане з вирівнюванням графіка навантаження тягової перетворювальної підстанції ТОВ1-160-1,2к-4000-УХЛ4. На перших етапах дослідження цього питання здійснено: аналіз складових навантаження тягової перетворювальної підстанції безконтактного транспорту [1] і аналіз можливості зниження максимуму навантаження тягової перетворювальної підстанції безконтактного транспорту; пошук і аналіз можливого технічного рішення зі збільшення числа використовуваних електровозів (В14-900). Як результат: запропоновано зменшити значення потужності, що передається двигунам, встановивши для цього на кожному електровозі автономне джерело енергії із заданою потужністю (джерело потужності); розраховано значення необхідної енергоємності автономного джерела енергії; зроблено висновок щодо доцільності подальшого аналізу, розрахунку і вибору конкретного накопичувача енергії та схеми його підключення на електровозі для збільшення кількості одночасно задіяних одиниць рухомого складу на горизонті.

Мета роботи. Вибір типу акумуляюючого елементу накопичувача енергії для забезпечення збільшення числа електровозів.

Аналіз досліджень і публікацій. Шахтний транспорт з безконтактною передачею енергії й досі залишається досить унікальною розробкою з рядом специфічних особливостей. У відомих літературних джерелах не знайдено методик вибору типу накопичувача енергії з урахуванням умов і особливостей експлуатації такого виду транспорту.

Результати дослідження. Сьогодні інтенсивно розвивається ідея застосування декількох видів джерел енергії в галузі автомобільного транспорту. Вже існує безліч комерціалізованих рішень різних автомобільних компаній світу. Режим роботи накопичувача енергії на автомобільному та електровозному транспорті (в аспекті вирівнювання графіка навантаження) не має принципових відмінностей, тому аналіз і вибір перспективних вторинних джерел енергії на прикладі автомобільного транспорту можна вважати обґрунтованим.

Вибір типу акумуляюючого елемента для гібридного транспортного засобу досить складне науково-технічно-економічне завдання. Результат його вирішення безпосередньо пов'язаний з подальшою доступністю і конкурентоспроможністю самого транспортного засобу. До певної міри це завдання може бути спрощене за допомогою аналізу ринку гібридних машин і джерел електроенергії, встановлених на них.

Найбільші виробники витрачають значні кошти на дослідження і проектування, очікуючи отримати прибуток, а це можливо лише за умови подальшої затребуваності продукції. Попит забезпечується й оптимальними технічними та експлуатаційними характеристиками компонентів продукції.

Проаналізуємо типи акумуляюючих елементів гібридних автомобілів, пропонованих у 2012 році (і деяких планованих до випуску) найбільшими (у 2010 році [2]) компаніями-виробниками (див. табл. 1).

Таблиця 1

Модель 1	Тип акумуляюючого 2
Toyota Prius Five (Two, Three, Four)	Герметичний нікель-металогідридний (Ni - MH), 6.5 А·ч, 201,6 В [3] [4]
Toyota Prius Plug - in Hybrid, Toyota Prius Plug - in Hybrid Advanced Prius	Літій-йонний [5]
Toyota Prius V Five (Two, Three)	Герметичний нікель-металогідридний [6]
Toyota Prius c Four (One, Two, Three,)	Герметичний нікель-металогідридний [7]
Toyota Camry Hybrid	Герметичний нікель-металогідридний [8]
Toyota Highlander Hybrid	Герметичний нікель-металогідридний [9]
Toyota RAV4 EV	Літій-йонний (Li - Ion) 41,8 кВт·ч [10]
General Motors Chevrolet Volt	Т-подібний літій-йонний 16,5 кВт·ч [11]
General Motors Cadillac Escalade Hybrid	Нікель-металогідридний [12]
Volkswagen Touareg Hybrid	Нікель-металогідридний [13]
Volkswagen Golf TDI Hybrid	Нікель-металогідридний [14]

Продовження таблиці 1.

1	2
Volkswagen Jetta 2013	Літій-йонний 1,1 кВт·ч [15]
Hyundai Sonata Hybrid	Літій-йонний [16]
Ford C - Max Hybrid	Літій-йонний 1,4 кВт·ч [17]
Ford C - MAX Energi	Літій-йонний 7,6 кВт·ч [17]
Ford Fusion SE Hybrid	Гібридний літій-йонний [18]
Ford Focus Electric	Літій-йонний з рідинним охолодженням 23 кВт·ч [19]
Ford Escape Hybrid	Нікель-металогідридний [20]
Honda Civic Hybrid	Літій-йонний [21]
Honda CR - Z	Нікель-металогідридний (Ni – MH), 5,75 А·ч, 100,8 В [22]
Honda Insight	Нікель-металогідридний (Ni – MH), 5,75 А·ч, 100,8 В [23]
Kia Optima Hybrid	Літій-полімерний [24]
KIA Forte LPI Hybrid	Літій-йонний з полімерним електролітом [25]
Kia Ray	Літій-йонний [26]
BMW ActiveHybrid 3	Літій-йонний [27]

Як видно з табл. 1: вибір найбільших компаній-виробників на даний момент розподіляється приблизно порівну між нікель-металогідридним і літій-йонним типами акумуляюючих елементів гібридної силової установки. Подальший аналіз при виборі кращого типу серед вторинних хімічних джерел струму доцільно проводити, порівнюючи саме нікель-металогідридний та літій-йонний акумуляюючі елементи.

Порівняння основних показників вибраних типів акумуляюючих елементів (див. табл. 2 [32, 33]) свідчить, що практично за всіма основними показниками літій-йонні акумуляюючі елементи кращі за нікель-металогідридні, окрім ціни.

Проте за деякими прогнозами [28], вартість літій-йонних акумуляюючих батарей, використовуваних в електромобілях, знизиться приблизно на третину вже до 2017 року. Це станеться за рахунок подальшого вдосконалення технології виробництва, підвищення обсягів поставок літію і зростанню об'єму продажів. Такого висновку дійшли аналітики компанії Pike Research, які резюмували свої висновки в опублікованому звіті.

ваній на початку 2012 року доповіді. Аналізуючи дані, що стосуються нових розробок відносно літій-йонних акумуляторів, на ринку варто чекати пристрої зі значно кращими енергетичними й експлуатаційними показниками: збільшення числа робочих циклів до порядку 7000 [29], питомої потужності – до 100 кВт/кг [30] та питомої енергоємності – до 525 Вт·год/кг [31].

Таблиця 2

Параметри акумуляторної батареї	NI/MH	Li - ion
Вартість	Середня	Висока
Питома енергетична місткість, Вт·год/кг	60—110	110-260
Внутрішній опір, Ом	0,5—0,2	0,15—0,25
Питома потужність, Вт/кг	500	800—3000
Число циклів заряд/розряд	300—500	500—1000
Чугливість до перезаряду	Середня	Висока
Час швидкого заряду, год	14	60—70 хв.
Макс. струм розряду, А	20 С	20 С
Саморозряд за місяць при 20°C, %	20	2-5
Напруга максимальна в комірці, В	1,85	4,18—4,20
Напруга мінімальна, В	1,37	2,5—2,75
Діапазон робочих температур, °С	-60 +55	-20 - +60
ККД, %	60–90 [34]	
Виробник (приклад)	Sanyo, Rayovac, Fujicell, AccuPower, Maha, Yuasa, Gold Peak, CDR King, Turnigy	Sony, HYPERION, Экопт, Walkera, A123 Systems

Значно менш розвинений альтернативний підхід до вибору акумуляючого елемента гібридного транспорту – використання йоністорів (суперконденсаторів).

Серед продукції провідних світових виробників автотранспортних засобів зустрічаються поодинокі рішення із застосуванням суперконденсаторів, як, наприклад, Honda FCX Clarity [35], в яких у підсистемі «Розгін–гальмування» застосовано йоністор власної розробки (суперконденсатор без традиційних «обкладинок»).

Фірмами Hyundai Motor і «Тролза» випускаються автобуси з живленням від йоністорів [36].

У 2011 році компанією Solaris представлено автобус Urbino 18 DIWA з прогресивною дизель-електричною гібридною силовою установкою паралельного типу на суперконденсаторах [37].

У Російській Федерації розробляється проєкт автомобіля (Е-мобіль), в якому використовується суперконденсатор як основний засіб для накопичення електричної енергії. Самі ці суперконденсатори поки не виготовляються серійно і розробляються паралельно з автомобілем [38].

Основні показники сучасних суперконденсаторів наведені в табл. 3 [39, 40].

Таблиця 3

Характеристики йоністорів	Значення
Вартість	висока
Питома енергетична місткість, Вт·год/кг	2 – 12
Внутрішній опір, Ом	0,006 – 0,35
Питома потужність, Вт/кг	1500 – 12000
Число циклів заряд/розряд	більше 100000
Час заряду, хв	від 15 до 40
Макс. струм розряду, А	до 5000
Саморозряд	дуже високий – близько 1 мкА
Діапазон робочих температур, °С	-50... +70
Ефективність, %	>90
Виробник (приклад)	ЭСМА, ИНКАР-м, Epcos, Maxwell Technologies, NessCap, Panasonic, Evans Capacitor

Порівняємо характеристики суперконденсаторів і літій-йонних акумуляторів. Обидва типи досить дорогі.

До суттєвих переваг літій-йонних акумуляторів можна віднести:

– дуже високу питому енергоємність;

– низький саморозряд,

а суперконденсаторів:

– висока питома потужність;

- дуже велика кількість циклів «заряд–розряд»;
- низький внутрішній опір;
- висока ефективність;
- мінімальний час заряду.

Відмітний недолік суперконденсаторів – досить високий саморозряд. За усіма іншими показниками принципових відмінностей практично нема.

Оцінити такі енергетичні параметри сучасних суперконденсаторів, як питома енергетична місткість, питома потужність та порівняти їх з вторинними хімічними джерелами струму можна за допомогою діаграми, зображеної на рисунку.

На діаграмі область «Літій-йонні дуже великої потужності» описує пристрої, розроблені останнім часом, що тільки починають виходити на ринок.

Слід зазначити, що прогрес у розвитку суперконденсаторів також існує, але не такий інтенсивний, як у хімічних джерел струму. В 2011 році групою вчених на чолі з Бором Джангом (Bor Jang) з американської компанії Nanotek Instruments на основі графенової плівки створено новий тип суперконденсатора, що має щільність зберігання енергії 85,6 Вт·год/кг – при кімнатній температурі та 136 Вт·год/кг – при температурі 80 °C [42].

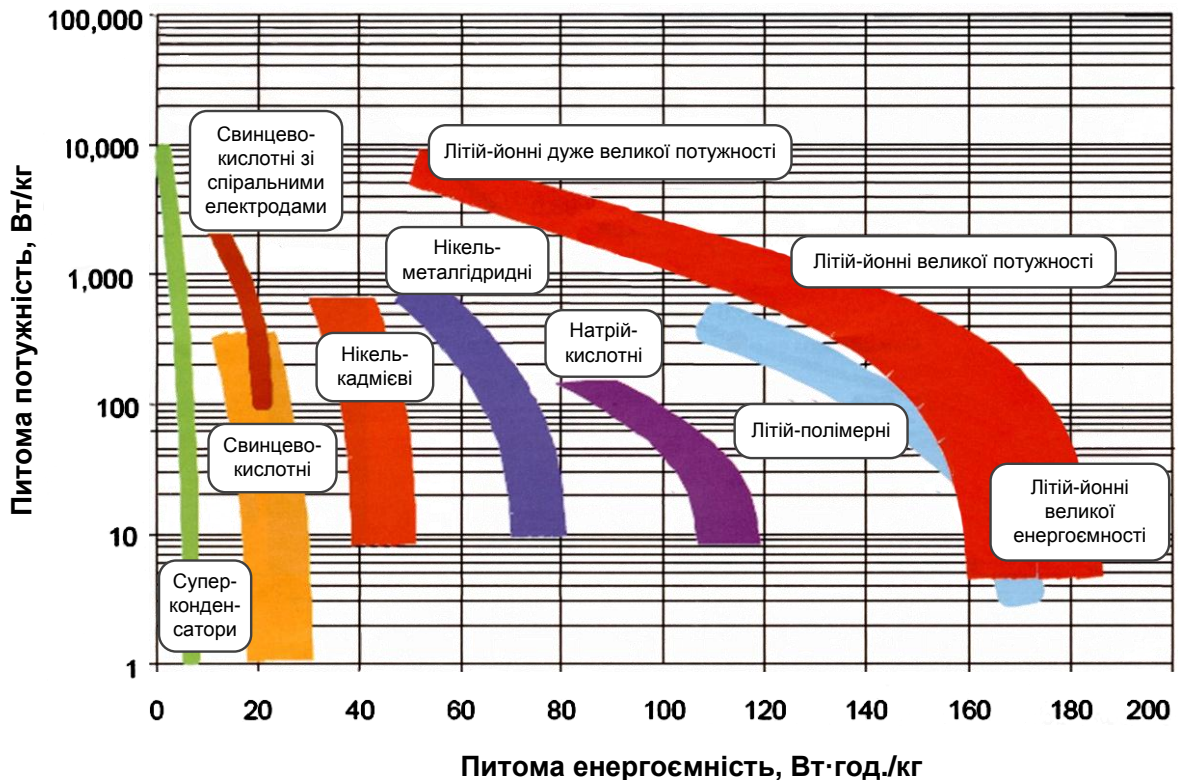
Таким чином, у найближчому майбутньому передбачається деякий паритет між йоністорами і літій-йонними акумуляторами.

Якщо робити вибір між суперконденсаторами і електрохімічними джерелами струму для застосування на шахтному транспорті, то слід взяти до уваги такий параметр, як вибухозахист.

Для забезпечення вибухобезпечності електрохімічних акумуляторів необхідні спеціальні заходи, що підвищує вартість їх експлуатації, вимагає високого рівня культури обслуговування. Експлуатовані на вугільних шахтах країни акумуляторні електровози вимагають значних щорічних витрат на поповнення кількості акумуляторних батарей та їх заміну. При зарядці батарей цих електровозів задіяний значний людський ресурс.

Йоністори, на відміну від хімічних джерел струму, мають ширший температурний діапазон експлуатації (зберігають працездатність при негативних температурах). У них практично необмежена кількість циклів заряд/розряд, вони здатні видати в імпульсі велику потужність з високим коефіцієнтом корисної дії та при цьому не розігріваються.

Пошук виробників засвідчив, що багато компаній з далекого і ближнього зарубіжжя виготовляють конденсатори з подвійним електричним шаром (див. табл. 3).



Діаграми енергетичних показників для різних типів батарей [41]

Суперконденсатори як накопичувачі мають високу питому потужність, вибухобезпечні, прості в експлуатації. Всі відзначені вище переваги дозволяють вважати їх одним з найбільш перспективних автономних джерел живлення для рудникового безконтактного електровоза.

Висновки

1. Режим роботи накопичувача енергії на автомобільному й електровозному транспорті (в аспекті вирівнювання графіка навантаження) не має принципових відмінностей, тому аналіз і вибір перспективних вторинних джерел енергії на прикладі існуючих рішень для автомобільного транспорту можна вважати обґрунтованим.
2. Вибір найбільших компаній-виробників гібридних автомобілів ділиться приблизно порівну між нікель-металогідридним і літій-йонним типами акумулюючих елементів гібридної силової установки. Практично за всіма основними показниками літій-йонні акумулятори кращі за нікель-металогідридні.
3. При виборі акумулюючого елемента гібридного транспорту світові виробники виявляють все більший інтерес до такого типу накопичувача енергії, як йоністор (суперконденсатор).
4. Такі переваги, як висока питома потужність, вибухобезпечність, простота в експлуатації, дуже велика кількість циклів заряд/розряд, низький внутрішній опір, висока ефективність, мінімальний час заряду дозволяють вважати суперконденсатор одним з найбільш перспективних автономних джерел додаткового живлення (відносно невеликої енергоємності) на рудниковому безконтактному електровозі для вирівнювання графіка навантаження тягової перетворювальної підстанції та можливості збільшення числа експлуатованих на горизонті електровоїв.

Список літератури

1. Составляющие нагрузки тяговой преобразовательной подстанции бесконтактного шахтного транспорта / Сиверин И.С., Дыбрин С.В. // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб.- Дніропетровськ: РВК НГУ, 2014.- Вип.92. – С. 37-40.
2. WORLD MOTOR VEHICLE PRODUCTION (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://oica.net/wp-content/uploads/ranking-2010.pdf>. Загол. з екрана.
3. Toyota Prius 2010 Performance & Specifications (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/prius-hybrid/specs.html>. Загол. з екрана.
4. Toyota Prius - купить экономичный автомобиль (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://www.toyota.ru/cars/new_cars/prius/index.tmex. Загол. з екрана.
5. Toyota Prius Plug-in Interior, Exterior & Safety Features (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/prius-plug-in/specs.html>. Загол. з екрана.
6. Toyota Prius v Specs (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/priusv/specs.html>. Загол. з екрана.
7. Toyota Prius c Specs (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/priusc/specs.html>. Загол. з екрана.
8. Toyota Camry Specs (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/camry/specs.html>. Загол. з екрана.
9. Toyota Highlander Specs (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/highlander/specs.html>. Загол. з екрана.
10. Toyota Highlander Specs (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.toyota.com/rav4ev/specs.html>. Загол. з екрана.
11. Volt Models & Specs (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.chevrolet.com/volt-electric-car/features-specs/options.html>. Загол. з екрана.
12. General Motors Cadillac Escalade Hybrid (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://auto.ru.msn.com/article.aspx?cp-documentid=156587137>. Загол. з екрана.
13. Volkswagen Touareg Hybrid (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://www.volkswagen.ru/models/touareg/features.s9_trimlevel_detail.suffix.html/the_touareg_hybrid~2Fhybrid.htm#/#/tab=e1c1d9e3d4a95dd4d68077fdd39f7b20. Загол. з екрана.
14. Volkswagen Golf TDI Hybrid (Фольцваген Гольф) (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://volkswagen.hcars.ru/golf_tdi. Загол. з екрана.
15. VOLKSWAGEN JETTA 2013 - САМЫЙ БЫСТРЫЙ ГИБРИД (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://energysafe.ru/environment/electric_vehicles/1011/. Загол. з екрана.
16. SONATA HYBRID SUPREME PERFORMANCE, EXTREME EFFICIENCY (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://worldwide.hyundai.com/WW/Showroom/Cars/Sonata-Hybrid/PIP/index.html>. Загол. з екрана.

17. C-MAX Specifications (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.ford.com/cars/cmax/specifications/engine/>. Загол. з екрана.
18. Model: Fusion Hybrid SE (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://www.ford.com/cars/fusion/trim/?trim=hybrid&showCategoryTab=viewAll#categoryPower_and_Handling. Загол. з екрана.
19. The Focus is available in 8 fuel-efficient models (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.ford.com/cars/focus/models/>. Загол. з екрана.
20. Photo Tour of Hybrid Batteries (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.hybridcars.com/gallery/22070/photo?page=2>. Загол. з екрана.
21. Civic Hybrid Specifications (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://automobiles.honda.com/civic-hybrid/specifications.aspx>. Загол. з екрана.
22. CR-Z Engineering (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://automobiles.honda.com/cr-z/specifications.aspx>. Загол. з екрана.
23. Insight Specifications (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://automobiles.honda.com/insight-hybrid/specifications.aspx>. Загол. з екрана.
24. Eco-technology - Kia Motors (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.kiamotors.com/vehicles/optima-hybrid/eco-technology.aspx>. Загол. з екрана.
25. KIA Forte LPI Hybrid (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://kia.kiev.ua/auto.php/model.picanto_new/topic.info/interesnoe_ob_jetoj_modeli/. Загол. з екрана.
26. Kia представила гибрид (фото) (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://dengi.ua/news/59508_Kia_predstavila_gibrid_foto.html. Загол. з екрана.
27. BMW ACTIVE HYBRID (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/efficientdynamics/phase_2/bmw_activehybrid/index.html. Загол. з екрана.
28. К 2017 году цены на литий-ионные аккумуляторы сократятся на треть (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://ecoconceptcars.ru/2012/03/k-2017-godu-ceny-na-litij-ionnye-akkumulyatory-sokratyatsya-na-tret.html>. Загол. з екрана.
29. Литий-ионное будущее: Аккумуляторы нового поколения (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.popmech.ru/article/3505-litij-ionnoe-budushee/>. Загол. з екрана.
30. Создана литий-ионная ячейка с очень высокой плотностью мощности и энергии (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://science.compulenta.ru/629667/>. Загол. з екрана.
31. Новая Li-Ion батарея: емкая и дешевая (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://iee.org.ua/ru/prog_info/21903/. Загол. з екрана.
32. Развитие рынка источников тока новых электрохимических систем (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://kit-e.ru/articles/powersource/2007_4_131.php. Загол. з екрана.
33. Проектирование гибридного транспортного средства на основе современных накопителей энергии (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://sibac.info/index.php/2009-07-01-10-21-16/4361-2012-10-25-06-55-09>. Загол. з екрана.
34. Анализ и сравнение характеристик аккумуляторов основных типов (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://inerton.ucoz.ru/publ/ehlektronika/khity/analiz_i_sravnenie_kharakteristik_akkumulyatorov_osnovnykh_tipov/14-1-0-21. Загол. з екрана.
35. Honda FCX Clarity (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Honda_FCX_Clarity. Загол. з екрана.
36. Ионистор (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Ионистор>. Загол. з екрана.
37. Solaris представил гибрид на суперконденсаторах (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.autocentre.ua/news/komavto/39124.html>. Загол. з екрана.
38. Ё-мобиль (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Ё-мобиль>. Загол. з екрана.
39. Суперконденсаторы для электротранспорта (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://sdisle.com/battery/ultracap/>. Загол. з екрана.
40. Супер конденсаторы (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.electrosad.ru/Electronics/SuperCon.htm>. Загол. з екрана.
41. Концепция развития электрического транспорта в России. (Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт. Федеральное государственное унитарное предприятие НАМИ) (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://nami.ru/uploads/news/presentation.pptx>. Загол. з екрана.
42. Суперконденсатор на основе графена устанавливает новый рекорд электрической емкости (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.dailytechinfo.org/nanotech/1883-superkondensator-na-osnove-grafena-ustanavlivaet-novyyj-rekord-yelektricheskoy-emkosti.html>. Загол. з екрана.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.