

*Ю. В. Черняк
В. О. Гатченко
А. В. Гаюр*

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ І ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМІВ ЗАСТОСУВАННЯ РЕКУПЕРАТИВНИХ СИСТЕМ НА ТРАНСПОРТІ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

У статті виконаний комплексний аналіз існуючих і перспективних напрямів використання рекуперативних систем на транспорті із застосуванням накопичувачів енергії. Здійснено огляд публікацій з використання різних типів накопичувачів енергії на залізничному та автомобільному транспорті.

В статье осуществлен комплексный анализ существующих и перспективных направлений использования рекуперативных систем на транспорте с использованием накопителей энергии. Проведен обзор публикаций по использованию разных типов накопителей энергии на железнодорожном и автомобильном транспорте.

In the article made integrated analysis of existing and future directions using recuperative systems in transport with the use energy storage. Authors made the survey of publications on the using different types of energy storage on rail and road transport.

Conclusions of the work are that the railways capacitive energy storage installed on some diesel locomotives where they provide reliable starting of diesel at low temperatures and a discharged battery. This drive extends battery life and allows the use of cheaper smaller capacity battery.

Ключові слова: накопичувачі енергії, конденсатори, маховик, економія паливно-енергетичних ресурсів, енергозбереження, енергоефективність, рекуперация.

Постановка проблеми. Ефективне використання паливно-енергетичних ресурсів на залізничному транспорті можливе за рахунок збільшення коефіцієнта корисної дії енергетичної системи та зменшення енергетичних втрат. Рекуперация енергії при експлуатації тягового рухомого складу є одним з найраціональніших шляхів енергозбереження.

При існуючих системах рекуперативної електричної енергії на залізничному транспорті, рекуперована енергія може використовуватись електрорухомим складом,

© Черняк Ю.В., Гатченко В.О., Гаюр А.В., 2014

який рухається на підйом, або ж невикористана енергія гаситься на баластних опорах тягових підстанцій з метою недопущення перенапруг в контактній мережі.

Перевага рекуперативних систем з накопичувачами електричної енергії полягає в тому, що вони ефективно працюють в широкому діапазоні напруг як джерела електричної енергії, так і її споживача, що дозволяє значно підвищити ефективність рекуперації за рахунок практично повного використання накопиченої енергії на розгінних та тягових режимах.

Впровадженню рекуперативних електричних систем на залізничному транспорті сприяє також поява надпотужних напівпровідникових елементів плавного регулювання електричного струму, що в порівнянні з тиристорами великої потужності діють більш надійно й мають більш високу граничну робочу частоту.

Ефективність використання рекуперативних систем зростає разом із підвищенням нерівномірності руху поїзда при частих гальмуваннях та розгінних режимах. З вищезазначеного можна зробити висновок, що на залізничному транспорті найбільший ефект від використання системи рекуперації електричної енергії може бути отриманий на електропоїздах, що працюють в приміському русі та маневрових тепловозах з електричною передачею, де спостерігається найбільша нерівномірність руху, що викликає значні зміни кінетичної енергії.

Аналіз основних досліджень і публікацій. В публікаціях [2 – 6] розглянуті існуючі накопичувачі енергії, виконане порівняння їх характеристик, дані огляди є конкретизованими для кожного випадку, але це не в повному обсязі відображає існуючі і можливі перспективи у використанні накопичувачів енергії в рекуперативних системах на транспорті.

Мета статті – аналіз існуючих і перспективних напрямів впровадження рекуперативних систем на залізничному транспорті.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для електричних рекуперативних систем можливе використання лужних або кислотних акумуляторів, але вони мають суттєві недоліки: значні обмеження за максимальним струмом зарядки й розрядки, відносно малий термін служби, зменшення ємності та погіршення характеристик при перезарядках, вихід із ладу при зберіганні в розрядженому стані тощо.

Одними з найцікавіших і найбільш прийнятних для електричних рекуперативних систем є конденсатори надвеликої ємності, що розроблені останнім часом і не потребують постійного контролю й регулярного обслуговування. Окрім цього, вони мають значно більший термін служби й допускають глибокі розряди без впливу на їхні характеристики [3].

На прикладі маневрового тепловоза ЧМЭЗ обґрунтовано вибір структури, принципу дії рекуперативної системи та схеми включення її в силові ланцюги транспортного засобу великої потужності на основі досвіду експлуатації рекуперативних систем на транспорті, а також характеристик та сфери використання електричних накопичувачів надвеликої ємності [1].

У статті [4] авторами розглянуто будову, технічні характеристики, експлуатаційні показники існуючих та перспективних типів акумуляторних батарей для рухомого складу залізниць України, визначено принципи ефективної та безпечної експлуатації, обслуговування і ремонту акумуляторних батарей. Автори загострюють увагу на використанні накопичувачів енергії в системах конденсаторного пуску тепловозних двигунів в стартерному режимі, як приклад, маневрово-гібридний тепловоз з гібридною силовою установкою ТЭМ9Н SinaraHybrid, який

являє собою чотирьохосний локомотив з електричною передачею змінного струму, обладнаний літій-іонними акумуляторами і суперконденсаторами.

Застосування накопичувачів енергії, здатних сприймати різкозмінні навантаження при одночасній стабілізації режиму роботи теплового двигуна, дозволить підвищити його надійність і екологічні показники, і покращити економічні показники роботи силової установки тепловоза зі збереженням його тягової характеристики.

Можливість модернізації маневрового тепловоза ЧМЭЗТ рекуперативною системою з конденсаторними накопичувачами енергії 30ЭК405, які випускаються ЗАО «ЭСМА», розглянута для підвищення паливної економічності і зменшення шкідливих викидів, оскільки основною складовою механічної роботи, виробленої тепловозом під час маневрів, буде робота, затрачена на збільшення кінетичної енергії рухомого складу, тобто його розгін, за яким відбувається, як правило, вибіг з наступним гальмуванням, при якому накопичена кінетична енергія гаситься гальмовими пристроями [5].

У статті [6] на підставі проведеного аналізу швидкостемірних стрічок при проведенні маневрової роботи на станції Ясинувата, встановили, що маневровим тепловозом за 12-годинну робочу зміну долається шлях всього в 20 – 30 км, при цьому кількість зупинок складає від 60 до 120. Автори статті зазначають, що до недавнього часу на тепловозах не було можливим рекуперувати енергію. Пояснювалось це відсутністю накопичувача, який би міг накопичити таку велику енергію (під час реостатного гальмування на маневровому тепловозі ЧМЭ-3^Т). Розглядалась можливість використання шатної акумуляторної батареї NKS150, однак у даного рішення існує низка суттєвих недоліків. Використання високоємних конденсаторів як додаткових джерел енергії при нерівномірному русі локомотива є більш переважаючим, ніж акумуляторна батарея. У системах електропостачання запропоновано акумуляування енергії електрифікованого транспорту за допомогою емнісних накопичувачів з одночасним розвантаженням мережі від неактивних складових повної потужності й стабілізацією напруги на навантаженні [7].

Розміщення конденсаторних систем безпосередньо на рухомому складі виключає втрати електроенергії в контактній мережі (як мінімум на 10%) як при споживанні електроенергії, так і при накопиченні енергії гальмування.

Спільно з ВНІЗТ у 2005 р. за завданням ВАТ «РЖД» почались роботи зі створення систем, які використовують енергію гальмування електропоїздів з накопичувачами на базі конденсаторів ЭЛТОН [8].

На автомобільному транспорті також розглядаються рекуперативні системи з конденсаторними накопичувачами.

Toyota використовувала суперконденсатори для рекуперації енергії гальмування на гоночному автомобілі Supra HV-R Hybrid. Supra став першим гібридним автомобілем в історії автоспорту [9].

Паралельно з Toyota, концерн Honda займається розробками власного гібридного автомобіля Honda Civic Hybrid. Вагомою відмінністю між гібридним автомобілем Toyota і Honda є те, що електромотор першого може працювати без допомоги бензинового двигуна за певних режимів, а двигуни Honda Civic Hybrid працюють паралельно – бензиновий двигун працює завжди, а електродвигун виконує роль «асистента».

Назва гібридної технології Honda – ІМА, що розшифровується як Integrated motor assistant. Електрична складова (електродвигун, блок батарей, блок керування електричною потужністю) – основа гібридного автомобіля призначена для економії палива бензиновим двигуном.

Ідея технології ІМА полягає у використанні енергії, яка зазвичай або гаситься опором двигуна при гальмуванні двигуном, або перетворюється в тепло при нагріванні гальмівних дисків, тобто корисно не використовується. Система ІМА дозволяє накопичити частину цієї енергії в батареях. Досягається це за рахунок того, що при гальмуванні підключається електродвигун, який в даному випадку працює в генераторному режимі, перетворюючи кінетичну енергію автомобіля в заряд батарей. І коли Honda Civic Hybrid потребує прискорення – батарея віддасть накопичену раніше енергію для роботи електродвигуна. Електродвигун товщиною 70 см розташований між бензиновим двигуном і коробкою передач замість маховика [10].

У 2011 р. Mazda оголосила про розробку системи i-ELOOP, яка використовує генератор змінної напруги для перетворення кінетичної енергії в електричну енергію при гальмуванні. Енергія, накопичена в двошаровому конденсаторі, використовується для подачі живлення для електричних систем автомобіля. При використанні в поєднанні з системою старт-стоп Mazda I-Stop, компанія стверджує, що досягнуто економії палива до 10% [11].

Широкого застосування на транспорті також здобули інерційні (механічні) накопичувачі енергії.

У Німеччині інерційний накопичувач енергії Powerbridge спочатку був розроблений компанією RWE Piller для використання в пристроях зниженої напруги для доповнення або заміни акумуляторних батарей. Відповідно до потужності найбільших тягових систем він був розрахований на живлення навантаження потужністю 1650 кВА протягом 10 с, тобто на покриття потреб в енергії при короткотермінових випадіннях мережі. Накопичувач може бути встановлений у будь-якому місці уздовж контактної мережі. У цьому випадку він здатний замінити додаткову тягову підстанцію для підтримки в мережі заданого рівня напруги [12].

Кінетична система рекуперації енергії (часто відома, як KERS) є автомобільною системою для накопичення кінетичної енергії гальмування автомобіля. Накопичена енергія акумулюється в накопичувачі (наприклад, маховик або акумуляторні батареї високої напруги) для подальшого використання при розгоні.

Перш за все потрібно звернути увагу на те, що система має два цикли роботи: перший цикл полягає в накопиченні енергії і виникає він тоді, коли болід гальмує і через ведучі колеса кінетична енергія потрапляє на вал електричного двигуна. Далі двигун передає енергію на блок керування системою, яка розподіляє енергію по батареях. Але існує другий цикл, який полягає у використанні енергії, що відбувається в процесі розгону, коли виникає необхідність у додатковій енергії. У момент пуску другого циклу блок керування збільшує потужність двигуна на величину накопиченої енергії.

Прикладами системи KERS є розробки: ZyteK, Flybrid [13], Torotrak [14] і Xtrac, що використовується на болідах «Формули – 1», яка передбачає встановлення допоміжної коробки передач, що керує безступінчатою трансмісією (CVT). КТК-KERS є частиною трансмісії. Проте, весь механізм, зокрема маховик, розташований на ступиці автомобіля (у вигляді барабанного гальма). В КТК-KERS дифе-

ренціал замінює CVT і передає крутний момент між маховиком і ведучими колесами автомобіля.

Перша з цих систем, була розроблена фірмою Flybrid. Ця система важить 24 кг і має енергоємність 400 кДж після врахування внутрішніх втрат. Власне маховик важить 5,0 кг і обертається зі швидкістю до 64500 обертів на хвилину. Максимальний крутний момент на маховику становить 18 Н·м, а крутний момент у з'єднанні коробки передач відповідно вище для зміни в швидкості [15].

Bosch Motorsport – підприємство, яке також займається розробками системи KERS для використання в автоспорті. Ці системи накопичення електроенергії для гібридних двигунів містять літій-іонний акумулятор з системою керування потужністю, або маховик з електродвигуном (максимальною потужністю 60 кВт (81 к.с.), а також систему керування KERS для контролю і управління батареєю [16]. Також на транспорті розглядається перспектива застосування надпровідних індуктивних накопичувачів. Надпровідні індуктивні накопичувачі мають високе значення індукції – до 5 Тл і середню щільність струму 10 – 105 А/см² при температурі 4 – 5 К. Потужні надпровідні накопичувачі дуже перспективні не тільки для живлення імпульсних навантажень, але і для регулювання виробництва і споживання електроенергії в цілих енергосистемах. Забезпечення стійкості магнітних систем надпровідних накопичувачів пов'язане з транспозицією елементарних ниток обмотки і секціонування котушок.

Складною проблемою є використання та регулювання живлення споживача накопиченою енергією з надпровідного накопичувача.

У даний час створені надпровідні індуктивні накопичувачі, які можуть запасати до 30 МДж. Зазвичай вони віддають енергію у вигляді імпульсів. Сучасні надпровідні накопичувачі мають максимальний струм в імпульсі – 10000 А і напругу 50 кВ, максимальну потужність 500 МВт при тривалості імпульсу 5 мс [17].

Висновки

Після проведення аналізу публікацій, можна зробити такі висновки:

1. На залізничному транспорті ємнісні накопичувачі енергії вже знайшли застосування. Їх встановлюють на деяких тепловозах, де вони забезпечують надійний пуск дизеля при низьких температурах і розрядженій акумуляторній батареї. При цьому накопичувач подовжує строк служби батареї і дозволяє використовувати більш дешеву батарею меншої ємності.

2. На сьогодні інерційні накопичувачі енергії широко застосовуються в системах електропостачання для накопичення енергії рекуперації електротранспорту та вирівнювання навантажень в тягових мережах.

3. Використання інерційних накопичувачів на борту залізничного рухомого складу є небезпечним у зв'язку з можливим виникненням дисбалансу маховика, який обертається з високою кутовою швидкістю.

4. Надпровідні індуктивні накопичувачі енергії зазвичай віддають енергію у вигляді імпульсів. Складною проблемою, на сьогодні, є використання та регулювання рівня напруги живлення споживача накопиченою енергією з надпровідного накопичувача. Застосування даного накопичувача енергії слід розглядати в перспективі.

5. В подальшому для застосування рекуперативних систем на моторвагонному рухомому складі, що експлуатується в приміському і міському сполученні за прототип можна обрати системи рекуперативного гальмування на автомобілях з електричним накопиченням енергії гальмування для подальшого використання при розгоні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Черняк Ю.В., Прилепський Ю.В., Грицук І.В. Фізична модель рекуперативної системи маневрового тепловоза: Монографія / Ю.В.Черняк, Ю.В. Прилепський, І.В. Грицук. – Донецьк: ДонІЗТ, 2010. – 196 с.
2. Черняк Ю.В. Физическая модель для изучения процессов рекуперации электрической энергии тепловоза ЧМЭЗТ / Ю.В. Черняк, Ю.В. Прилепский, А.Н. Горобченко, Н.В. Володарец // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 108. – С. 69 –74.
3. Варакин А.И. Маневровый и универсальный локомотив с гибридной силовой установкой и накопителем энергии на базе электрохимических конденсаторов / А.И. Варакин, А.Н. Варакин, В.В. Менухов // Наука и техника транспорта. – 2007. – Вип. 2.
4. Устенко О.В., Пасько О.В. Використання накопичувачів енергії для підвищення параметрів локомотивів. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика» науково-виробничого журналу. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 293 – 296.
5. Бірюков О.С., Фалендиш А.П., Володарець М.В., Золотухін І.В. Модернізація маневрового тепловоза ЧМЭЗТ з метою зменшення витрати палива і значного зниження викидів шкідливих речовин. // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 126. – С. 157–160.
6. Писарев Л.Т., Черняк Ю.В., Терованесов М.Р. Рекуперативное торможение поездов с использованием импульсных энергоемких конденсаторов. // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – Донецьк: ДонІЗТ, 2009. – Вип. 17. – С. 97 – 106.
7. Колб А.А. Аккумуляция энергии рекуперации электрифицированного транспорта с помощью емкостных энергонакопителей. // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – ДНУЗТ, 2010. – С. 89 – 94.
8. Варакин И.Н., Менухов В.В. «ЭЛТОН» предлагает – качество, надежность, экономичность. // Газета «Евразия вести». – Элтранс, 2009. – Вип. 10. – С. 22 – 23.
9. Toyota Hybrid Race Car Wins Tokachi 24-Hour Race; In-Wheel Motors and Supercapacitors [Virtual Resource] // Green Car Progress. – Access mode: URL: <http://www.greencarcongress.com/2007/07/toyota-hybrid-r.html>. – Title from Screen. – Date of Access: 21.10.2014.
10. Honda Civic Hybrid – зеленый «лепесток» [Виртуальный ресурс] // ProCivic.ru – Режим доступа: <http://www.procivic.ru/civic/honda-civic-hybrid/>. – Загл. с экрана. – Проверено: 21.10.2014.
11. PSA Peugeot Citroën and Bosch developing hydraulic hybrid powertrain for passenger cars; 30% reduction in fuel consumption in NEDC, up to 45% urban; B-segment application in 2016 [Virtual Resource] // Green Car Progress. – Access mode: URL: <http://www.greencarcongress.com/2013/01/psabosch-20130122.html>. – Title from Screen. – Date of Access: 21.10.2014.
12. Инерционный накопитель энергии для тяговой сети // Железные дороги мира. – 2004. – № 2. – ISSN 0321-1495.
13. Flybrid Systems LLP [Virtual Resource] // Flybrid Systems. – Access mode: URL: <http://www.flybridsystems.com/Roadcar.html>. – Title from Screen. – Date of Access: 21.10.2014.
14. Torotrak toroidal variable drive CVT [Virtual Resource] // Xtrac. – Access mode: URL: <http://www.econologie.info/share/partager/1221402703fydhZG.pdf>. – Title from Screen. – Date of Access: 21.10.2014.
15. F1 KERS: Flybrid [Virtual Resource] // Racecar Engineering. – Access mode: URL: <http://www.racecar-engineering.com/news/racing-tech/f1-kers-flybrid-2>. – Title from Screen. – Date of Access: 21.10.2014.
16. Bosch Developing Modular KERS Systems for Range of Motorsport Applications [Virtual Resource] // Green Car Congress. – Access mode: URL: <http://www.greencarcongress.com/2008/11/bosch-developin.html>. – Title from Screen. – Date of Access: 21.10.2014.
17. Надпровідний накопичувач [Електронний ресурс] // Технічна енциклопедія TechTrend. – Режим доступу: <http://techtrend.com.ua/index.php?newsid=6401>. – Заг. з екрану. – Перевірено: 21.10.2014.