

УДК 629.423.1

О.І. САБЛІН, В.Г. КУЗНЕЦОВ, В.В. АРТЕМЧУК

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

*Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*

Анотація. Розглянуто сучасний стан використання рекуперації електроенергії в системі електричної тяги та пов'язані з цим проблеми. Виконана оцінка потенціалу енергозбереження за рахунок повного використання енергії гальмування та розглянуті шляхи подальшого підвищення ефективності рекуперації електроенергії неавтономного електротранспорту.

Ключові слова: електротранспорт, рекуперація, електроенергія, надлишкова, ефективність.

Аннотация. Рассмотрено современное состояние использования рекуперации электроэнергии в системе электрической тяги и связанные с этим проблемы. Выполнена оценка потенциала энергосбережения за счет полного использования энергии торможения и рассмотрены пути дальнейшего повышения эффективности рекуперации электроэнергии неавтономного электротранспорта.

Ключевые слова: электротранспорт, рекуперация, электроэнергия, избыточная, эффективность.

Abstract. Considers the current state of the use of energy recuperation in the system of electric traction and related problems. The estimation of the energy saving potential by making full use of braking energy, and examined ways to further improve the efficiency of energy recuperation of electric transport.

Keywords: transport, recovery, electricity, excessive efficiency.

ВСТУП

Рекуперація електроенергії при гальмуванні електротранспорту є найпотужнішим джерелом зниження енергоємності системи електричної тяги, яке на сучасній технічній базі також дозволяє плавно регулювати гальмівну силу майже до зупинки транспортного засобу, зменшує викиди в навколишнє середовище металевих пилю від механічного гальмування, підвищує плавність ходу та безпеку руху. Проте до сьогодні існують технологічні проблеми раціонального використання потенціалу рекуперації, одна з яких полягає в необхідності електротягового навантаження в зоні рекуперації, що не може бути в повній мірі забезпечено існуючими графіками руху поїздів.

Розвиток рекуперації електроенергії в системі електротранспорту є комплексною проблемою, яка включає в себе вплив електродинамічного гальмування залізничного електротранспорту (особливо з зосередженою тягою) на верхню будову колії та динаміку поїзда, проблеми електромагнітної сумісності рекуперуючого електрорухомого складу (ЕРС) та рейкових кіл автоблокування і локомотивної сигналізації, а також електроенергетичні проблеми в системі тягового електропостачання (СТЕ), пов'язані з якістю енергії рекуперації, її втратами, та впливом на систему зовнішнього електропостачання. Тому вирішення задач підвищення ефективності рекуперації електроенергії в системі електричної тяги потребують системного багатofакторного підходу до оптимізації режимів електропостачання та рекуперативного гальмування ЕРС, що на сьогодні в повній мірі не розроблено.

МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вдосконаленню процесів відновлення енергії електротранспорту при гальмуваннях присвячена велика кількість робіт багатьох дослідників [1], направлених на збільшення обсягів енергії рекуперації, розробку заходів щодо її ефективного використання, підвищення надійності електрообладнання при рекуперації та автоматизацію режиму.

Кількість електроенергії (кВт·год), що може бути рекуперована електротранспортним засобом при гальмуванні для зупинки або для зниження швидкості визначається зменшенням його кінетичної енергії і дорівнює [2]

$$A_{\text{рек}} = 10^{-5} m \left(1,073(1 + \gamma)(v_{\text{п}}^2 - v_{\text{к}}^2) - \frac{\omega_0 \pm i_{\text{ср}}}{102(1 + \gamma)a} \right) \eta_{\text{рек}}, \quad (1)$$

де m – маса поїзда, кН; $(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції обертючих мас поїзда; $v_{\text{п}}$, $v_{\text{к}}$ – швидкість відповідно на початку і кінці гальмування, м/с; a – уповільнення поїзда при гальмуванні, м/с²; ω_0 – основний питомий опір руху поїзда на ділянці гальмування, Н/кН; $i_{\text{ср}}$ – середній ухил ділянки гальмування, ‰; $\eta_{\text{рек}}$ – ККД ЕРС в режимі рекуперації. При гальмуванні поїзда для підтримки заданої швидкості руху на спусках кількість генерованої електроенергії визначається потенційною енергією поїзда, як [2]

$$A_{\text{рек}} = 2,77 \cdot 10^{-3} m (i_{\text{ср}} - \omega_0) s_{\text{ш}} \eta_{\text{рек}}, \quad (2)$$

де $s_{\text{ш}}$ – довжина шкідливого спуску, м.

В умовах реальної експлуатації на кількість електроенергії, яка може бути повернена в мережу при гальмуваннях ЕРС окрім параметрів, що входять до формул (1) і (2), впливає багато, в тому числі випадкових, факторів, таких як наявність електротягового навантаження в зоні рекуперації, необхідний режим гальмування, кваліфікація машиніста та ін. При раціональних режимах руху поїздів рекуперація дозволяє повернути в мережу значну частину витраченої електроенергії, що особливо актуально для електротранспорту циклічної дії (тролейбуси, трамваї, метро, електропоїзда), у якого потенціал рекуперації теоретично сягає 60...70 % [3], оскільки при частих прискореннях та гальмуваннях на здійснення роботи з подолання сил опору руху витрачається менше половини сумарної енергії, що споживається на рух поїзда, а інша її частина переходить у кінетичну енергію, яка при відсутності рекуперації розсіюється в гальмах для зупинки. Реально, на сьогодні досягається максимальна економія енергії у вантажному та пасажирському русі поїздів лише 3...12 %, а при циклічній тязі – 15...25 %.

Раціональні режими гальмування ЕРС, направлені на підвищення обсягів рекуперації електроенергії на сьогодні достатньо розроблені. Наприклад, для вантажних електровозів розроблені режими так званої інтенсивної рекуперації [2], при яких можна збільшити повернення енергії в мережу на 30...40 % за рахунок меншого уповільнення при гальмуванні, але такі режими приводять до зростання перегінного часу ходу та зменшення пропускної здатності залізниць.

Одним з основних недоліків режиму рекуперації неавтономного електротранспорту є його значна залежність від режиму напруги в контактній мережі. Для надійного електродинамічного гальмування у всьому діапазоні напруг на ЕРС застосовують систему автоматичного рекуперативно-реостатного гальмування, при якій тяговий засіб переходить з рекуперації в режим реостатного гальмування якщо напруга на струмоприймачі перевищує максимально допустиме значення. При цьому однак генерована енергія використовується неефективно, бо втрачається в реостатах.

Збільшення рекуперації електроенергії в системі електричної тяги вимагає впровадження відповідних організаційних та технологічних заходів з боку СТЕ, які при існуючих графіках руху повинні забезпечити прийом та ефективне використання виробленої енергії іншими поїздами. Одним з таких заходів є встановлення оптимальних рівнів напруг холостого ходу на шинах тягових підстанцій (ТП), при яких можливе перетікання надлишкової енергії рекуперації на сусідні міжпідстанційні зони (МПЗ), що однак супроводжується збільшенням втрат енергії в тяговій мережі, особливо на одноколіїних ділянках. В результаті імітаційного моделювання режимів СТЕ встановлено [4], що оптимальні напруги на шинах ТП дозволяють збільшити обсяги рекуперації енергії на 10 % і на 50 % зменшити кількість зривів рекуперативного гальмування, що в результаті дає зниження електроспоживання на тягу за лічильниками ТП близько 5 %.

Як вже було сказано, можливість ефективного використання енергії рекуперації від поїзда, що перебуває в режимі гальмування визначається наявністю поїздів у режимі тяги на одній МПЗ. Однак існуюча організація руху поїздів не може в повній мірі вирішувати вказану задачу, що приводить до утворення, так званої, надлишкової енергії рекуперації. У більшості випадків це викликає зрив режиму рекуперації і втрату потенційно можливої енергії гальмування поїзда (втрати енергії в механічних гальмах або реостатах). Оцінка рівня такої енергії при роботі окремого ЕРС в умовах експлуатації представляє певні труднощі, оскільки встановлені на існуючому рухомому складі лічильники дозволяють реєструвати лише енергію витрачену на тягу та повернуту в мережу при рекуперації. В СТЕ об'єми невикористаної на тягу енергії рекуперації можуть бути оцінені за показаннями лічильників на поглинаючих резисторах або інверторах ТП.

Для оцінки потенціалу рекуперації електроенергії в системі електричної тяги в даній роботі було

застосовано спеціалізований програмний комплекс «Автоматизована система раціональних режимів тягового електропостачання» [5], який на базі імітаційного моделювання потоку поїздів дозволяє виконувати розрахунки режимів СТЕ з заданими параметрами та обчислювати витрати енергії на тягу, енергію рекуперації та надлишкову енергію рекуперації поїздів. Для розрахунків була обрана двоколійна ділянка системи електричної тяги постійного струму Ясинувата-Чаплино Донецької залізниці, довжиною 143,6 км, середнім ухилом 2,1 ‰, яка містить 7 МПЗ. Статистичні розподіли та основні імовірнісні характеристики енергій, отриманих при моделюванні, приведені на рис. 1.

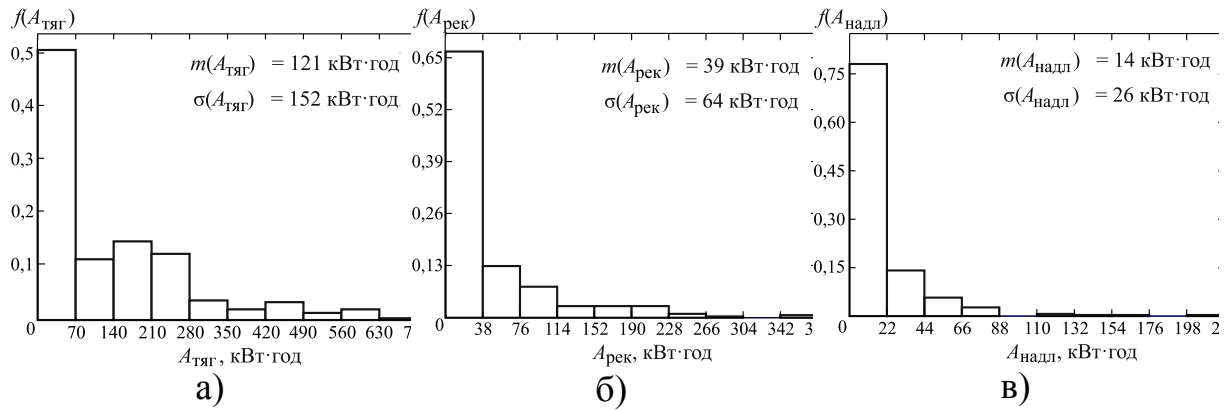


Рис. 1. Гістограми витрати енергії на тягу $A_{\text{тяг}}$ (а), енергії рекуперації $A_{\text{рек}}$ (б) та надлишкової енергії рекуперації $A_{\text{надл}}$ (в) поїздів на ділянці Ясинувата-Чаплино

В результаті моделювання встановлено, що на розглядуваній ділянці енергія рекуперації поїздів $A_{\text{рек}}$ може сягати 60 % від витраченої енергії на тягу $A_{\text{тяг}}$ (рис. 1), що особливо характерно для ділянок зі значними спусками. Надлишкова енергія рекуперації $A_{\text{надл}}$ визначалася з врахуванням існуючого графіку руху поїздів на ділянці, що дозволило оцінити ефективність використання рекуперованої енергії (іншими поїздами на тягу), яка становить не більше 65 % (від виробленої електроенергії при гальмуванні поїздів), а інша її частина втрачається. Оскільки на сьогодні системою рекуперативного гальмування парк ЕРС обладнаний неповністю, крім того з ряду причин в експлуатаційній роботі рекуперація використовується не завжди, тому можна припустити, що в перспективі, коли рекуперативне гальмування буде основним засобом гальмування, проблема надлишкової енергії рекуперації більш загостриться.

В системі електричної тяги магістрального залізничного транспорту проблема надлишкової енергії рекуперації вирішується за рахунок реверсування такої енергії в зовнішню систему електропостачання, що однак потребує на ТП додаткового обладнання. Так на ТП системи електротяги постійного струму (3,3 кВ), що обладнані інверторами, надлишкова енергія рекуперації повертається в первинну енергосистему, але при цьому погіршуються її режими. На рис. 2 представлені графіки потужності електротранспорту постійного струму в умовах реальної експлуатації, з яких видно, що ЕРС при гальмуваннях генерує нестабільну енергію імпульсного характеру, яка поступає в первинну мережу ще більш спотвореною після інвертування.

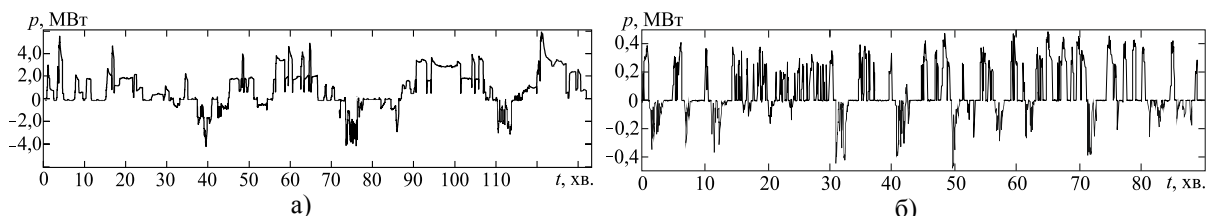


Рис. 2. Часові діаграми потужності вантажного електровоза ДЕ1 (а) і трамваю ТЗД (б) (рекуперація при $p < 0$)

У електровозів пік-фактор генерованої потужності при рекуперації досягає значення 7,52, коефіцієнт форми 3,72, коефіцієнт гармонік 3,6 [6], а у трамваїв ці показники ще гірші. При передачі такої енергії по тяговій мережі до 10 % від неї втрачається в СТЕ, крім того повернення енергії в первинну систему електропостачання має ще ряд суттєвих недоліків:

– ускладнюється обладнання ТП;

– при включенні інвертора в мережу виникають циркуляційні струми в контурі, утвореному випрямлячами;

– енергія, що передається в первинну мережу має низьку якість;

– погіршується режим живлення нетягових споживачів;

– значно підвищується напруга в тяговій мережі.

Для забезпечення якості електроенергії рекуперації згідно вимог стандарту ГОСТ 13109-97 необхідно значне вдосконалення і ускладнення обладнання ТП, що виконують прийом і передачу надлишкової енергії рекуперації в первинну енергосистему, тому проблема поліпшення якості такої енергії набуває дуже важливого значення.

На ТП системи електропостачання тяги змінного струму (27,5 кВ, 50 Гц) надлишкова енергія рекуперації при певних умовах безпосередньо може бути повернена у зовнішню систему електропостачання, однак вона володіє перерахованими недоліками. Тут важливо зазначити, що повернення надлишкової енергії рекуперації в первинну енергосистему з ТП, як постійного струму (після інвертування), так і змінного струму (безпосередньо) можливо тільки за умови, що система зовнішнього електропостачання здатна прийняти цю енергію. Таким чином, виникає необхідність фундаментального дослідження проблеми доцільності передачі надлишкової енергії рекуперації в зовнішню систему електропостачання або її локалізації в енергосистемі електричної тяги. У зв'язку з цим організаційним заходом щодо підвищення ефективності використання надлишкової енергії рекуперації залишається розробка енергооптимальних графіків руху поїздів.

Для локалізації надлишкової енергії рекуперації в системі електричної тяги в останній час поширюються дослідження і часткові впровадження накопичувачів електроенергії, застосування яких в СТЕ, крім цього дозволяє істотно знизити встановлену потужність ТП. На сьогодні в системі електропостачання метрополітенів використовуються інерційні механічні накопичувачі, наприклад типу НКЕ-3В з енергоємністю 6,5 кВт·год та ККД 0,97. Комплекс з 12 енергоблоків накопичувачів даного типу дозволяє акумулювати енергію з потужністю 1,5...2,5 МВт, що дозволяє забезпечити пуск та розгін до швидкості 60 км/год двох електропоїздів метрополітену. Використання емнісних або надпровідних індуктивних енергоємних елементів на сьогодні ще не отримало поширення і знаходиться на стадії доопрацювання. З іншого боку розробляються схемні рішення на предмет застосування накопичувальних пристроїв безпосередньо на борту неавтономного електротранспорту, де в якості акумулюючих елементів на сьогодні розглядаються лише конденсатори. Перевагою такого розташування є мінімізація втрат енергії рекуперації при її передачі до накопичувача, проте це погіршує масогабаритні показники ЕРС. У цьому зв'язку питання про оптимальне розташування накопичувального елемента в системі електричної тяги на сьогодні залишається відкритим і потребує більш глибокого вивчення.

ВИСНОВКИ

В результаті імітаційного моделювання було визначено потенціал рекуперації електроенергії в системі електричної тяги на прикладі Донецької залізниці. Встановлено, що на розглядуваній ділянці енергія рекуперації поїздів може сягати 60 % від затраченої енергії на тягу, а надлишкова енергія рекуперації, яка визначалась з урахуванням реальних графіків руху поїздів, становить 35 % від виробленої енергії. Потенціал рекуперації електроенергії суттєво залежить від параметрів ділянки (довжини, ухилу) та існуючого графіка руху поїздів, тому повинен визначатися окремо для кожної ділянки системи електричної тяги. Для розвитку рекуперації електроенергії та ефективного використання її потенціалу потрібна комплексна оцінка та наукове обґрунтування технічних засобів та методів регулювання її якості. Одним з перспективних технологічних напрямків підвищення ефективності використання рекуперації електроенергії в системі електричної тяги є розвиток методів і засобів ситуаційного керування режимами СТЕ, в першу чергу ситуаційне керування режимами напруги.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги / Г. К. Гетьман. – Дн-вск : Изд-во Маковецкий, 2011. – 456 с.
2. Сулима С. Д. Повышение эффективности рекуперативного торможения электровозов постоянного тока / С. Д. Сулима, дис... канд. техн. наук. – Дн-вск, 2001. – 189 с.
3. Сидорова Н. Н. Энергоёмкость перевозочного процесса в электрической тяге поездов и обоснование путей энергосбережения / Н. Н. Сидорова, дис... докт. техн. наук. – Москва, 2001. – 286 с.
4. Тарута П. В. Повышение эффективности использования энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения постоянного тока / П. В. Тарута, дис... канд. техн. наук. – Омск, 2004. – 164 с.
5. Автоматизована система раціональних систем тягового електропостачання: свід-во про реєстр. авт. прав на твір № 46611, зареєстр. 03.12.2012, Україна / Кузнецов В. Г., Шинкаренко В. І., Коваленко Н. В.; заявник та власник Дніпропетр. нац. ун-тет залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна.
6. Саблин О. И. Анализ качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического

транспорту / О. И. Саблин // Вестник НТУ«ХПИ». – Харьков, 2013. – Вип. 38. – С. 186-189.

Надійшла до редакції 09.12.2013р.

САБЛІН ОЛЕГ ІГОРОВИЧ – к.т.н., доцент, доцент кафедри електротехніки та електромеханіки, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпропетровськ, Україна.

КУЗНЕЦОВ ВАЛЕРІЙ ГЕННАДІЙОВИЧ – д.т.н., доцент, професор кафедри електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпропетровськ, Україна.

АРТЕМЧУК ВІКТОР ВАСИЛЬОВИЧ – д.т.н., доцент, професор кафедри електрорухомого складу залізниць Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпропетровськ, Україна.