

УДК 621.333.41

Я.В. ЩЕРБАК, д-р техн. наук, професор, В.П. НЕРУБАЦЬКИЙ, аспірант (УкрДАЗТ)

Аналіз застосування рекуперативного гальмування на залізницях України

Ключові слова: рекуперативне гальмування, економія енергії, електровоз.

Ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів в різних галузях промисловості України у три рази нижче, ніж в промислово розвинутих країнах Західної Європи та США [1]. Основою енергетичної політики залізничного транспорту України є стимулювання енергозбереження і підвищення ефективності споживання енергії.

Зважаючи на постійне підвищення вартості електроенергії, а також введенням диференційованих тарифів її оплати, в 1996 р. Державною Адміністрацією залізничного транспорту України була прийнята і затверджена «Програма енергозбереження на залізничному транспорті України на 1996—2010 роки». Дана програма була направлена на скорочення споживання паливно-енергетичних ресурсів на тягу поїздів. У червні 1998 р. Кабінетом Міністрів України була прийнята постанова № 769 «Про заходи державної підтримки залізничного транспорту», направлена на ефективніше використання основних фондів залізничного транспорту, а саме, зниження на один відсоток питомих витрат енергоресурсів на тягу поїздів за кожен рік.

Рекуперація електричної енергії є суттєвим джерелом економії електроенергії на тягу поїздів і важливим засобом підвищення ефективності роботи електрифікованих залізниць. Повернення електроенергії в тягову мережу при застосуванні рекуперативного гальмування дозволяє зменшити використання електричної

енергії на тягу поїздів і, як наслідок, зменшує питомі витрати в електро-тязі. Рекуперативне гальмування забезпечує економію електричної енергії, надає можливість підвищувати швидкість руху, сприяє зниженню зносу гальмівних колодок та бандажів колісних пар. Завдяки цьому рекуперативне гальмування вже декілька десятиліть використовується на залізницях, як одна із складових енергозберігаючої технології нерезівного процесу.

В залежності від умов роботи залізниць та характеристик електро-рухомого складу існують свої оцінки ефективності рекуперативного гальмування та рекомендації до його застосування. Питання надійності і раціональності режимів рекуперації вивчалися з самого початку застосування даного виду гальмування на полігоні залізниць вченими країн СНД [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9], а також вчених багатьох розвинутих країн світу. При завантаженому графіку руху поїздів інтервал між поїздами обчислюється хвилинами, і велика частина електроенергії, що рекуперується в контактну мережу при електричному гальмуванні, споживають поїзди, що знаходяться в тяговому режимі, а менша передається на тягові підстанції, оснащені інверторними агрегатами або поглинаючими опорами. Тому при завантаженому графіку руху поїздів частка рекуперуємої електричної енергії, яка використовується неефективно, є незначною. При зниженні інтенсив-

ності руху поїздів відповідно збільшується частка надмірної енергії рекуперації.

Вирішення проблем, що пов'язані з підвищенням ефективності рекуперативного гальмування та його застосуванням на електрорухомому складі залізниць, і досі є актуальною задачею для наукових досліджень як в СНД [10, 11, 12, 13, 14, 15], так і за його межами. Так, в Японії, науково-дослідним інститутом залізничної техніки (RTRI) з метою уникнення перешкод обмеження по напрузі, що виробляється тяговими двигунами в генераторному режимі під час регулювання швидкості поїздів від максимальної практично до нульової, запропоновано метод усунення цих обмежень за рахунок введення в коло додаткових резисторів [16]. В [17] автором розглянуті теоретичні і технічні аспекти електродинамічного гальмування, яке особливо актуально в швидкісному русі, коли швидкість досягає 400...500 км/год (такий рухомий склад в теперішній час випробовується в Німеччині та Японії). Також запропоновано метод регулювання гальмівного зусилля шляхом безконтактного керування опором гальмівного реостату (за допомогою напівпровідникового перетворювача). Вченими України розглядається використання конденсаторних батарей при рекуперативному гальмуванні в якості додаткового джерела енергії [18] та застосування систем на базі мікроконтролерів, здатних з метою підвищення ефективності рекуперативного гальмування формувати задані форми гальмівних характеристик [19].

За обсягами вантажних перевезень залізниці України посідають 4 місце на Євразійському континенті, поступаючись тільки залізницям Китаю, Росії, Індії. Вантажонапруженість українських залізниць (річний обсяг перевезень на 1 км) у 3—5 разів перевищує відповідний показник розвинених європейських країн.

Залізницями України за 2009 р. на тягу поїздів і нетягові потреби лише електроенергії було використано 5,4 млрд. кВт·г. Тому в умо-

вах зростаючого енергодефіциту і постійного зростання тарифів на енергоресурси недовикористання такого важливого резерву енергозбереження в перевізному процесі як рекуперативне гальмування є неправомірним. Об'єктивно його оцінюють у 8–10% повернення електроенергії, витраченої на тягу поїздів. Проте сьогодні можливості рекуперації використовуються далеко не повністю. Про це свідчить аналіз обсягів рекуперації електричної енергії на залізницях України [20]. Останнім часом повернення електроенергії не перевищує 2,21% від її споживання і щорічно знижується. Впродовж останніх тринадцяти років цей показник в середньому не перевищує 1,71% (рис. 1). Фактичний розподіл поверненої електроенергії на залізницях України [21], наприклад, за 2004 р. (рис. 2) дозволяє детально проаналізувати ситуацію, що склалася.

Одна з причин, що стримує застосування рекуперативного гальмування, — велике число локомотивів з несправними схемами рекуперації і необладнаних ними спочатку. Якщо практично всі вітчизняні вантажні електровози постійного струму (ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11), які зараз працюють на залізницях України, оснащені схемами рекуперативного гальмування [22], то 15% експлуатованого парку машин змінного струму взагалі не мають електричного гальмування, на 60% є тільки реостатне гальмування і лише 25% мають рекуперативне гальмування (ВЛ65, ВЛ80Р, ВЛ82, ВЛ80^{ТК}). В той же час, досвід створення в Росії енергоекономного електропоїзда ЕД6, що дозволяє гальмувати в режимі рекуперації практично до повної зупинки поїзда, свідчить про можливість повернення в контактну мережу до 30% електроенергії.

Несправність схеми рекуперативного гальмування може бути викликана наступними причинами:

- порушення регулювання захисних реле та електричних апаратів через вібрацію, втрати пружності регулювальних пружин або з інших причин;

- інтенсивне зношення окремих бандажів колісних пар через непра-

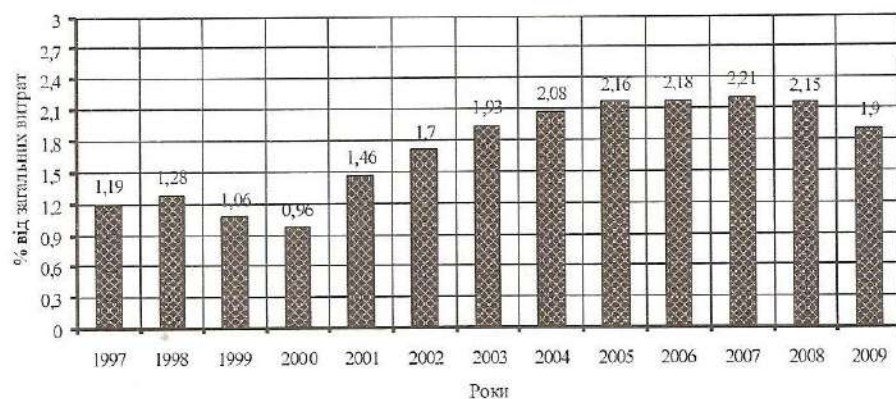


Рис. 1. Динаміка повернення енергії рекуперації по роках.



Рис. 2. Повернення енергії рекуперації в тягову мережу по залізницях у 2004 р.

вильну експлуатацію електровоза. При цьому різниця в характеристиках колісно-моторних блоків може бути значною;

- різниця між характеристиками перетворювачів при спільній роботі двох електровозів серій ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11 через неякісне регулювання або після заміни перетворювача;

- ослаблення регулювальних хомутиків і наявність слідів електрокорозії резисторів. При цьому опір резисторів може значно змінюватися.

Зазначені причини призводять або до зниження ефективності застосування рекуперативного гальмування, або до частих відмов схем у роботі. Тому постійний контроль за надійною роботою схем рекуперативного гальмування має першорядне значення.

У 2005 р. Державною адміністрацією залізничного транспорту України на зміну «Технологічної інструкції по налагодженню схем рекуперативного гальмування електровозів постійного струму» ТН-480 від 6.08.1982 року була прийнята «Технологічна інструкція по налагодженню схем рекуперативного

гальмування електровозів постійного струму» [21], яка призначена для забезпечення безперервної роботи електровозів постійного струму в режимі рекуперативного гальмування та максимального зниження питомих норм витрат електроенергії на тягу поїздів за рахунок підвищення ефективності рекуперативного гальмування, шляхом своєчасного і якісного налагодження схем рекуперативного гальмування ремонтними бригадами. Інструкція встановлює загальні вимоги щодо послідовності процесу налагодження схем рекуперативного гальмування та технічних характеристик електрообладнання, яке входить до схеми рекуперативного гальмування електровозів всіх серій, що експлуатуються на залізницях України.

Рекуперативним і реостатним гальмуванням обладнані також і відносно нові електровози постійного струму ДЕ1 виробництва ДП «НВК «Електровозобудування». За період 1998–2007 рр. Укрзалізницею було придбано 40 електровозів, 23 з яких експлуатуються на Придніпровській залізниці та 17 — на

Донецькій. В 2007—2008 рр. Укрзалізниця придбала нові уніфіковані вантажні електровози ВЛ11М/5-М/6 потужністю 4600 кВт та конструкційною швидкістю 100 км/год виробництва Тбіліського електробудівного заводу, які також обладнані схемами рекуперативного гальмування. Наприкінці 2008 р. Укрзалізниця замовила розробку і виготовлення на ВАТ «ХК «Луганськтепловоз» магістральних вантажних електровозів постійного струму 2ЕЛ4 з рекуперативно-реостатним електричним гальмуванням. Що стосується електрорухомого складу залізниць змінного струму, то починаючи з 2004 р. Укрзалізницею придбано 18 вантажно-пасажирських електровозів змінного струму спільного виробництва ДП «НВК «Електробудування» з німецьким концерном «Сіменс АГ», обладнаних рекуперативним гальмуванням. На даний час вони експлуатуються в пасажирському русі в локомотивному депо Київ-Пасажирський Південно-Західної залізниці.

Є ряд причин об'єктивного і суб'єктивного характеру, які гальмують застосування рекуперації. Її використання зачіпає інтереси багатьох служб: руху, електропостачання, локомотивної, шляху, вагонного господарства, автоматики та зв'язку. Різні підрозділи доріг мають позитивні і негативні приклади впливу електричного гальмування на їх експлуатаційні показники. Практично в кожному господарстві виникають як додаткові витрати, що забезпечують можливість застосування рекуперації, так і доходи, що утворюються за рахунок генерації і повернення електроенергії, підвищення пропускних спроможностей ділянок залізниць, забезпечення безпеки руху поїздів і поліпшення ряду інших експлуатаційних показників перевізного процесу. Тому віддачу від рекуперативного гальмування можна оцінювати тільки по сумарному економічному ефекту, що досягається в цілому по Укрзалізниці, а не по окремих дорогах і їх господарствах.

До комплексу техніко-економічних переваг, що визначають не-

обхідність і можливість застосування рекуперативного гальмування, відносяться наступні:

- зниження питомої витрати електроенергії на тягу поїздів за рахунок її повернення в контактну мережу і зниження витрати на власні потреби електровоза;

- підвищення технічної швидкості руху за рахунок особливостей характеристик рекуперативного гальмування — підтримка постійної швидкості на спусках (замість її перепадів при поєднанні режимів пневматичного гальмування і вибігу);

- збільшення середньодобового пробігу і продуктивності локомотива за рахунок зростання технічної швидкості, а також зниження часу простою локомотива з поїздом на станціях обробки (немає масової заміни колодок);

- підвищення пропускної спроможності ділянок залізниць за рахунок підвищення швидкості на спусках, зниження часу обробки складів після спуску;

- прискорення обороту локомотивів і вагонів і, у зв'язку з цим, зниження їх потреби;

- підвищення безпеки руху поїздів за рахунок наявності в поїзді додаткового засобу гальмування;

- економія електричної енергії при рекуперативному гальмуванні;

- економія гальмівних колодок, зниження витрат на їх заміну;

- економія на обточуванні колісних пар.

Крім того, система енергозабезпечення Львівської залізниці дозволяє повернення електричної енергії, виробленої електровозами при застосуванні рекуперативного гальмування, безпосередньо в систему зовнішнього енергоспоживання. На інших залізницях в даний час електрична енергія має бути використана іншим локомотивом в межах дії тягової підстанції, або погашена в реостатах.

В той же час підвищення рівня вищих гармонік зворотного тягового струму в рейках при рекуперації потенційно збільшує рівень перешкод на пристрої автоматичної локомотивної сигналізації і на рейкові ланцюги, що може привести до зростання економічних втрат із-за можливих непланових зупинок і затримок поїздів після відмов систем СЦБ.

Перехідні процеси в електричних колах електрорухомого складу, які визначаються параметрами цих кіл, а також характером зовнішніх впливів на них: зміна напруги в контактній мережі, включення і виключення в колах тягових електродвигунів, частковим або повним коротким замиканням, порушенням нормальних умов зчеплення коліс з рейками тощо, — ускладнюють роботу електрообладнання, чинять вплив на якість керування процесом гальмування, якщо супроводжуються великими відхиленнями навантаження від сталих значень і якщо час їх завершення відносно великий. Допустимість таких перехідних процесів оцінюють виходячи з умов надійної роботи електричного обладнання (тягові двигуни, статичні збудники тощо), перевантажень і перенапруг в електричних колах електровоза [23, 24, 25].

На ділянках залізниць з важким гірським профілем шляху і великим вантажопотоком тяговий режим характеризується безперервною зміною електричних навантажень контактної мережі та тягових підстанцій, що викликає різкі коливання напруги, яка підвищується до електровозів.

Серед фахівців є різні думки, при якій напрузі в контактній мережі можливо використовувати рекуперативне гальмування. Практика експлуатації засвідчила, що рекуперативне гальмування можна застосовувати при напрузі в контактній мережі 2500—3700 В. Верхня межа 3700 В обумовлена тим, що при рекуперації напруга на пантографі підніметься на 200—300 В і відповідатиме максимально допустимому значенню. Нижня межа 2500 В встановлена з тих міркувань, що при великому навантаженні на ділянці напруга в окремі моменти знижується до 2500 В. При напрузі в контактній мережі нижче за це значення рекуперативне гальмування застосовувати не слід, тому що така низька напруга свідчить про аварійне положення в системі енергопостачання. В цьому випадку можливі великі кидки напруги.

При масовому застосуванні рекуперації середній рівень напруги в контактному дроті підвищується на

200—300 В, а межі коливань напруги зменшуються, що свідчить про зменшення втрат енергії в контактній мережі [26].

Таким чином, рекуперація електроенергії значно полегшує енергопостачання, підвищує середній рівень напруги в контактній мережі, скорочує втрати енергії, сприятливо позначається на швидкості руху.

Багаторічною практикою встановлено, що на ділянках з рекуперативним гальмуванням унаслідок підвищеної дії на шлях, в основному в поперечному напрямі, збільшується інтенсивність бічного зносу рейок, вихід дерев'яних шпал, виділення елементів стикових, проміжних скріплень і протиугонів.

Комплексна оцінка впливу всіх чинників в загальному техніко-економічному ефекті від застосування рекуперації дозволяє виявити найбільш ефективні умови її використання. Були визначені також граничні показники застосування електричного гальмування, відпрацьовані схеми і режими водіння поїздів, що забезпечують найменшу негативну дію рекуперації на суміжні господарства.

Дослідженню впливу режимів роботи поїздів на поточне утримання колії присвячена значна кількість робіт вчених СНД [5, 27, 28, 29]. Якщо прийняти сумарну економію від застосування рекуперативного гальмування за 100%, то 53% приходить на економію електроенергії і 47% на економію в системі автогальм. Додаткові ж витрати на ремонт електровозів і верхньої будови колії при використанні рекуперації складають 48% [30]. Таким чином, економія на автогальмах (47%) практично покриває експлуатаційні витрати, а економічний ефект досягається за рахунок повернення електровозом електричної енергії в контактну мережу.

З огляду на те, що вантажообіг на електрифікованих ділянках останнім часом зростає, ефективність використання рекуперативного гальмування важко переоцінити. Враховуючи сказане, необхідно направити зусилля всіх причетних господарств Укрзалізниці на пошук технічних

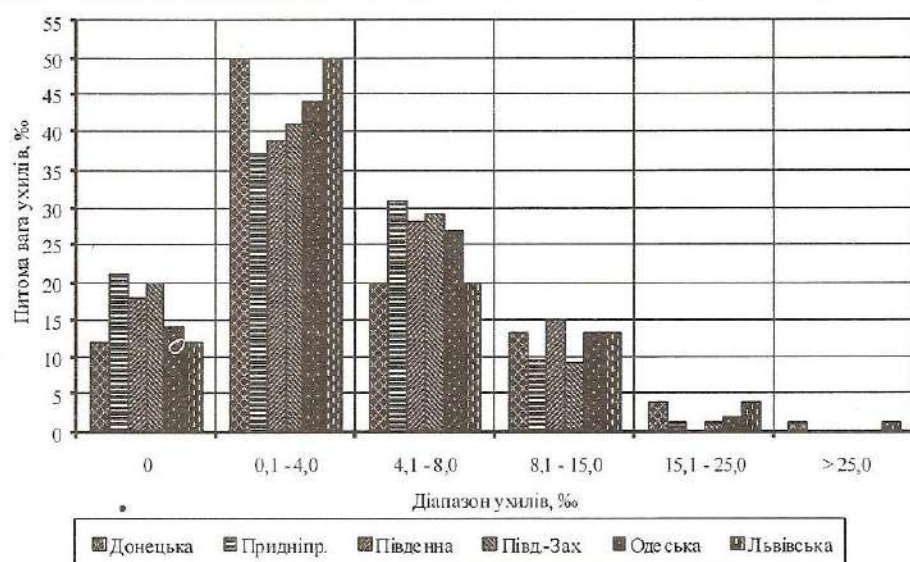


Рис. 3. Розподіл ухилів на залізницях України.

рішень, що знижують її негативні наслідки, як загальногалузеве завдання.

Резервами збільшення кількості електроенергії, що повертається в контактну мережу при застосуванні рекуперативного гальмування, є:

відновлення та своєчасне і якісне налагодження схем рекуперативного гальмування на електровозах;

підтримання оптимального рівня напруги в контактній мережі;

організація максимального використання електроенергії рекуперації іншими електровозами;

модернізація тягових підстанцій постійного струму для забезпечення рекуперації енергії постійного струму контактної мережі в живильну мережу змінного струму.

У суміжних господарствах повинні бути прийняті заходи по зменшенню негативного впливу рекуперативного гальмування на експлуатаційні показники. Так в колійному господарстві необхідно створювати посилені колійні конструкції, в локомотивному і електропостачанні — компенсувати реактивну потужність і знижувати гармонійний склад струму рекуперації. У господарстві автоматики, телемеханіки та зв'язку слід підвищувати захисну спроможність рейкових ланцюгів СЦБ від перешкод. У ряді випадків, можливо, доведеться відійти від типових конструкцій і пристроїв і ухвалити нестандартні рішення, орієнтовані

для застосування на ділянках стійкої рекуперації енергії. Сумарно подібне призводить до зниження на 0,5—0,7% питомої витрати електроенергії на тягу поїздів.

Природно, коли в умовах енергодефіциту ведеться всемірний пошук альтернативних джерел енергії (вітер, сонце, біопаливо, диверсифікація вугілля тощо), нехтувати таким могутнім джерелом, як оборотна кінетична енергія поїзда, не можна. Реостатне гальмування, на жаль, переводить її в тепло, що йде на обігрів атмосфери. Застосуванню рекуперації повинне сприяти впровадження сучасних високоенергоємних накопичувачів енергії, які найближчими роками можуть бути доступні для систем тягового електропостачання залізниць.

Українські залізниці мають в своєму розпорядженні широкі можливості для розширення полігону рекуперації завдяки тому, що профіль шляху залізниць України має в основному рівнинно-горбистий профіль із достатньо великою кількістю малих ухилів (рис. 3) [31].

Необхідно створювати галузеву програму по широкому використанню рекуперативного гальмування на залізницях України. Придніпровська залізниця потенційно одна з найефективніших по полігону рекуперації і в той же час одна з перших на мережі наближена до граничних умов цієї ефективності із-за високого заповнення пропускних спроможностей.

Розробка нових способів керування процесом рекуперативного гальмування на електрорухомому складі залізниць неможлива без розробки нових систем керування або модернізації існуючих. Цьому об'єктивно сприяє сучасний розвиток елементної бази: поява швидкодіючих мікроконтролерів з широкими можливостями для програмування, IGBT елементів на значні струми та напруги.

Таким чином, подальше підвищення ефективності рекуперативного гальмування повинно йти, з одного боку, шляхом розширення полігону його застосування, з іншого — шляхом вдосконалення самої системи рекуперації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Землянов В.Б. Энергооптимальні технології аналізу та регулювання електроспоживання на тягу поїздів [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступ. к.т.н.: Спец. 05.22.09.-електротранспорт / В.Б. Землянов. — Дніпропетровськ, 2000. — 20 с.
2. Трахтман Л.М. Электрическое торможение электроподвижного состава [Текст] / Л.М. Трахтман. — М.: Транспорт, 1965. — 202 с.
3. Тулунов В.Д. Повышение эффективности систем электрического торможения локомотивов [Текст] / В.Д. Тулунов. — М.: Транспорт, 1968. — 112 с.
4. Капустин Л.Д. Электропоезда с электрическим торможением [Текст] / Л.Д. Капустин. — М.: Транспорт, 1971. — 256 с.
5. Эффективность и надёжность рекуперации на электрифицированных дорогах постоянного тока [Текст] / Труды ВНИИЖТа — М.: Транспорт, 1965. — Вып. 291. — 142 с.
6. Осадчий Л.К. Расширение полигона рекуперации — резерв сбережения электроэнергии [Текст] / Л.К. Осадчий, Г.Я. Корепанов, Л.В. Петрович и др. // Электрическая и тепловозная тяга, 1969. — № 7. — С. 4—6.
7. Башук И.Б. Автоматическое управление рекуперативным торможением электропоездов постоянного тока [Текст] / И.Б. Башук, В.Н. Ляпустин, Г.В. Путкардзе и др. // Электрическая и тепловозная тяга, 1971. — № 12. — С. 30—31.
8. Барковский Б.С. Способ повышения эффективности рекуперативного торможения [Текст] / Б.С. Барковский, Б.А. Лозин // Труды ОмИИТ «Исследование электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава». — Омск, 1974. — Т. 163. — С. 75—80.
9. Гуткин Л.В., Борисов Г.П. Энергетическая эффективность рекуперативно-реостатного торможения пригородных электропоездов постоянного тока [Текст] / Л.В. Гуткин, Г.П. Борисов // Труды ВНИИЖТа. — М.: Транспорт, 1987. — № 4. — С. 20—25.
10. Тулунов В.Д. Эффективность рекуперативного торможения электропоездов постоянного тока [Текст] / В.Д. Тулунов, Д.В. Минаев // Железнодорожный транспорт. — 2005. — № 10. — С. 47—50.
11. Андриенко П.Д. Исследование режимов торможения в системе импульсного регулирования серийного электродвигателя [Текст] / П.Д. Андриенко, С.И. Шило, И.Ю. Немудрый // Электротехника та електроенергетика. — 2007. — №2. — С. 11—14.
12. Баранов В.А. Правильное торможение — гарантия безопасности [Текст] / В.А. Баранов, В.Н. Барщенков, Р.С. Дегтярёв, С.Н. Лукашенко // Локомотив. — 2008. — № 1. — С. 14—15.
13. Котельников А.В. Рекуперация повышает энергетическую эффективность дорог [Текст] / А.В. Котельников, А.Я. Коган, Н.С. Назаров, А.А. Скачков // Локомотив. — 2008. — № 4. — С. 20—22.
14. Шальнев А.П. Моделирование системы управления прессом с рекуперативным тормозом [Текст] / А.П. Шальнев, А.М. Литвиненко // Электротехнические комплексы и системы управления. — 2009. — № 3. — С. 19—23.
15. Черняк Ю.В., Прилепский Ю.В., Горобченко А.Н., Володарец Н.В. Физическая модель для изучения процессов рекуперации электрической энергии тепловоза ЧМЭЗТ [Текст] / Ю.В. Черняк, Ю.В. Прилепский, А.Н. Горобченко, Н.В. Володарец // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. — 2009. — № 108. — С. 69—74.
16. Использование резисторов для повышения эффективности рекуперативного торможения с высокой скорости [Текст] // Железные дороги мира. — 2005. — № 11. — С. 68—72.
17. Liudvinavicius L., Lingaitis L.P. Electrodynamic braking in high-speed rail transport [Text] // Transport. — 2007. — Vol 22. — № 3. — P. 178—186.
18. Писарев Л.Т. Рекуперативное торможение поездов с использованием импульсных энергоёмких конденсаторов [Текст] / Л.Т. Писарев, Ю.В. Черняк, М.Р. Терованесов // Збірник наукових праць ДонІЗТ. — 2009. — № 17. — С. 97—106.
19. Устименко Д.В. Рациональные режимы рекуперации электропоездов [Электронный ресурс] / Украина, Днепропетровск, Национ. ун-тет железн. трансп. им. акад. В. Лазаряна. — Режим доступа: [www/ URL: http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Geta/2003_71/22.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Geta/2003_71/22.pdf) / — Загл. с экрана.
20. Сергієнко М.І. Основні напрямки роботи Укрзалізниці з енергозбереження та її результати [Текст] / М.І. Сергієнко // Международный информационный научно-технический журнал «Локомотив информ». — 2010. — № 4. — С.24—26.
21. Технологічна інструкція по налагодженню схем рекуперативного гальмування електропоездов постійного струму [Текст]. — К.: Держ. адмін. залізн. трансп. України, 2005. — 184 с.
22. Медлин Р.Я. Рекуперация — важное звено энергосберегающей технологии [Текст] / Р.Я. Медлин // Железнодорожный транспорт. — 1986. — № 9. — С. 58—60.
23. Захарченко Д.Д. и др. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электромашины и трансформаторы [Текст] / Д.Д. Захарченко, Н.А. Ротанов, Е.В. Горчаков и др. — М.: Транспорт, 1968. — 295 с.
24. Чорний О.П. Моделирование электромеханических систем [Текст] / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.И. Родькин — Кременчук, 2001. — 376 с.
25. Крутов В.И. Переходные процессы систем автоматического регулирования [Текст] / В.И. Крутов. — М.: Машиностроение, 1965. — 423 с.
26. Карасёв А.Н. Экономия электрической энергии на электропоездах [Текст] / А.Н. Карасёв, А.Б. Дашкевич. — М.: Трансжелдориздат, 1960. — 51 с.
27. Тихменёв Б.Н. Эффективность электрического торможения на электропоездах переменного тока [Текст] / Б.Н. Тихменёв, А.Л. Лозановский, О.А. Некрасов, Д.А. Демченко, Л.И. Скиба, А.С. Копанев / Железнодорожный транспорт. — 1968. — № 2. — С. 47—51.
28. Фаминский Г.В. Повышение использования рекуперации при электропоездовой тяге [Текст] / Г.В. Фаминский // Труды ВНИИЖТа. — М.: Транспорт, 1951. — Вып. 42. — С. 13—31.
29. Сулима С.Д. Повышение эффективности рекуперативного торможения электропоездов постоянного тока [Текст] : автореф. дис. на получение науч. степ. к.т.н.: Спец. 05.22.09.-електротранспорт / С.Д. Сулима. — Днепропетровск, 2001. — 20 с.
30. Некрасов О.А., Лаптев В.А., Черноусов Л.А. Электрическое торможение — важный фактор эффективности [Текст] / О.А. Некрасов, В.А. Лаптев, Л.А. Черноусов // Железнодорожный транспорт, 1986. — № 1. — С. 54—57.
31. Кірка Г.М. Інтеграція залізничного транспорту України у європейську транспортну систему [Текст]: Монографія. — 2-ге вид., переробл. і допов. / Г.М. Кірка. — Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. — 248 с.