

**МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

СУЛІМА СТАНІСЛАВ ДМИТРОВИЧ

УДК 621.337.522

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ
ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.22.09 - Електротранспорт

**АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Дніпропетровськ – 2001

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизованого електропривода Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту (ДПТ) Міністерства транспорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
ДУБИНЕЦЬ Леонід Вікторович,
Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту Міністерства транспорту України,
завідуючий кафедрою автоматизованого електропривода.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
БРАТАШ Віктор Олександрович,
Український науково-дослідний проектно-конструкторський інститут електровозобудування (УЕлНДІ) Минпромполітики України, директор інституту;

кандидат технічних наук,
ЗЕМЛЯНОВ Володимир Борисович,
Придніпровська залізниця, Укрзалізниця, Міністерство транспорту України, начальник інформаційно-статистичного центру

Провідна установа: Харківська державна академія залізничного транспорту, кафедра “Експлуатація і ремонт рухомого складу”, Міністерство транспорту України, м. Харків.

Захист відбудеться “14” лютого 2002 р. о 14¹⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському державному технічному університеті залізничного транспорту за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Ак. Лазаряна, 2, ауд.314.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту.

Автореферат розісланий “ 10 ” січня 2002 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор

М.О. КОСТИН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Рекуперація є важливою складовою частиною енергозберігаючої технології процесу перевезень на залізничному транспорті. В 70-х, 80-х роках економія електроенергії за рахунок рекуперації становила у середньому 10% від її витрат на тягу поїздів. За останні роки умови роботи залізниць України суттєво змінились. Зменшились обсяг перевезень, швидкість руху, підвищились експлуатаційні витрати. Для забезпечення життєдіяльності залізниць особливо гостро постало питання підвищення ефективності його роботи на основі застосування ресурсозберігаючих технологій, включаючи засоби економії електроенергії. Але з-за ряду об'єктивних та суб'єктивних обставин застосування рекуперації різко зменшилось. Так у 1999 році енергія рекуперації від загальних витрат електроенергії на тягу по всіх залізницях України склала усього 2%. У той ж час вартість електроенергії має стійку тенденцію підвищення, і її частина у вартості перевезень буде збільшуватись. Це говорить про необхідність проведення теоретичних та практичних досліджень в галузі рекуперативного гальмування електрорухомого складу (ЕРС) з урахування сучасних умов роботи залізниць.

З зв'язку з вищевикладеним тема дисертації **актуальна**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Обраний напрямок досліджень пов'язаний з планом виконання науково-дослідних робіт у Дніпропетровському державному технічному університеті залізничного транспорту (ДПТ) в галузі застосування рекуперації на електровозах постійного струму (номера держреєстрації 0100U004126, 0100U004127).

Робота виконана відповідно з: головними напрямками розвитку науки і техніки; законом України про основи державної політики в галузі науки і науково-технічної діяльності; постановою Кабінету Міністрів України “Про заходи державної підтримки залізничного транспорту” від 2.06.1998 №769; щорічними координаційними планами науково-дослідних, дослідно-конструкторських робіт “Укрзалізниця”; програмою “Електрозберігання на залізничному транспорті України на період 1996-2010 року”, схваленої рішенням техніко-економічної ради “Укрзалізниця” від 26.06.1996; концепцією та програмою реструктуризації на залізничному транспорті України, які затверджені рішеннями Колегії Міністерства транспорту України відповідно 18.06.1997 (протокол №14) та 18.08.1998 (протокол №30).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності рекуперативного гальмування електрорухомого складу постійного струму у сучасних умовах роботи залізниць України, шляхом вибору раціонального режиму рекуперації.

Об'єкт дослідження – вантажний перевізний процес на електрифікованих залізницях України.

Предмет дослідження – раціональні режими рекуперативного гальмування електровозів постійного струму.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

1. Провести аналіз накопиченого досвіду рекуперації з точки зору сучасних умов роботи залізниць;
2. Знайти нові шляхи збільшення енергії рекуперації;
3. Розробити відповідні математичні моделі, знайти математичні співвідношення між параметрами, які характеризують значення енергії рекуперації, з урахуванням реальних характеристик перевізного процесу і діючих електровозів;
4. Розробити рекомендації щодо раціонального застосування рекуперативного гальмування на електровозах постійного струму у сучасних умовах та на найперший час;
5. Оцінити ефективність розроблених рекомендацій.

Методи дослідження - для вирішення поставлених у роботі задач використані: аналіз науково-технічної літератури в галузі рекуперації та узагальнення попереднього досвіду, основні положення теорії електричної тяги для визначення шляхів підвищення ефективності рекуперації; математичне моделювання процесів, пов'язаних з підвищенням економії електроенергії при рекуперативному гальмуванні; метод найменших квадратів при знаходженні аналітичних виразів для характеристик рекуперативного гальмування електровозів постійного струму; елементи математичної статистики, теорії імовірності при визначенні раціонального рівня напруги у контактній мережі; аппроксімація характеристик тягових двигунів при розробці рекомендацій щодо перерахунку гальмівних характеристик електровозу у зв'язку із зміною напруги у контактній мережі.

Експериментальна перевірка отриманих результатів виконана на діючих електровозах у реальних умовах. Застосування вищевказаних достовірних розділів математики, теорії електричної тяги, а також добра збіжність теоретичних та практичних результатів підтверджують **обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій**, отриманих у роботі.

Наукова новизна одержаних результатів. До основних наукових результатів, отриманих автором особисто, і які виносяться на захист відносяться:

1. Вперше видвинуте та доведене автором припущення про доцільність рекуперації на спусках із зниженням швидкості.
2. Отримані аналітичні вирази для характеристик рекуперативного гальмування електровозів серій ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1, що дозволяє у більшому обсязі застосовувати ЕОМ при дослідженні режимів рекуперації різних видів, підвищити коректність та точність цих досліджень.
3. Запропоновані методи визначення раціональних ділень рекуперативного гальмування та режимів рекуперації на них з урахуванням реальних значень напруги у контактній мережі,

робочих характеристик електровозів, швидкостей руху, ваги поїздів, довжини та уклону спуску.

В цілому наукова новизна роботи полягає: в розробці та реалізації математичних моделей, отриманих співвідношень між параметрами, які характеризують процес перевезень і дають можливість визначити раціональний режим рекуперації у сучасних умовах роботи залізниць; в застосуванні розроблених рекомендацій та підвищенню ефективності рекуперації як важливої ланки енергозберігаючих технологій на залізницях.

Отримані нові науково обгрунтовані теоретичні та експериментальні результати щодо визначення раціональних режимів рекуперації у сукупності є суттєвими для розвитку галузі науки про основи електричної тяги.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані математичні моделі, отримані співвідношення, рекомендації можуть бути повністю застосовані для визначення раціональних режимів рекуперації на сучасних залізницях України.

Результати дослідження впроваджені на Придніпровській залізниці, в Українському науково-дослідному проектно-конструкторському інституті електровозобудування (УЕЛНДІ) Мінпромполітики України, у навчальний процес в ДПТі. Очікуваний економічний ефект 6,44 млн. грн. за рік тільки на Придніпровській залізниці.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно сформулював мету, задачі дослідження, наукові положення, виконав теоретичну частину роботи, брав участь у проведенні експериментів. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Всі публікації, крім [4], без співавторів. У публікації [4] автору належить ідея і методика визначення раціонального рівня напруги в контактній мережі при рекуперації шляхом аналізу статистичних даних дослідних поїздок.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались на: засіданні вченої ради Українського науково-дослідного проектно-конструкторського і технологічного інституту електровозобудування (Дніпропетровськ, УЕЛНДІ, 1999); 10-й міжнародній конференції “Проблеми механіки залізничного транспорту. Динаміка, надійність та безвідказність рухомого складу” (Дніпропетровськ, ДПТ, 2000); 3-й міжнародної науково-технічної конференції “Стан і перспективи розвитку електрорухомого складу” (Новочеркаськ, ВАТ “ВЭЛНИИ” і ВАТ “НПО НЭВЗ”, 2000); семінарі Інститута Електродинаміки Національної академії наук України “Перетворювачі енергії у технологічних процесах транспорту” (Дніпропетровськ, ДПТ, 2000); спільному науковому семінарі кафедр автоматизованого електропривода, електрорухомого складу і теоретичних основ електротехніки (Дніпропетровськ, ДПТ, 2000).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані в п’яти наукових статтях у фахових

виданнях та матеріалах двох міжнародних конференцій. Чотири наукових статті написані автором самостійно.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, що викладені на 122 сторінках машинописного тексту і які містять 26 рисунків і 32 таблиці, переліку літературних джерел із 92 найменувань, викладений на 8 сторінках, 9 додатків на 59 сторінках. Ілюстрації (рисунки) і таблиці, які розміщені на окремих сторінках дисертації, займають 8 сторінок. Повний об'єм дисертації складає 189 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність задачі і показано її зв'язок з науковими програмами та темами, сформульовані мета й основні наукові та практичні задачі, які потрібно вирішити для підвищення ефективності рекуперації електровозів постійного струму, викладені наукові положення, що захищаються, показані наукова новизна та практична цінність одержаних результатів, а також показано рівень апробації результатів роботи, кількість публікацій за темою та особистий внесок автора.

У першому розділі показано сучасний стан досліджуваної задачі. На основі аналізу реальних статистичних даних показано, що кількість енергії рекуперації на залізницях України зменшилась у теперішній час в 5-6 разів в порівнянні з 70-ми, 80-ми роками.

Доведена необхідність поновлення у повному обсязі традиційних методів рекуперації, коли рекуперативне гальмування вантажних електровозів застосовувалось в основному на спусках для підтримки сталою швидкості руху, та запропоновано застосовувати нове, інтенсивне з точки зору збільшення енергії рекуперації, гальмування. Сутність пропозиції у тому, що перед місцями обмеження швидкості та перед зупинками постійно застосовувати рекуперативне гальмування для зменшення швидкості замість електропневматичного, як це робиться у теперішній час і робилося в більшості випадків раніше.

При інтенсивній рекуперації на спусках зменшення швидкості створює об'єктивну можливість більшого використання кінетичної та потенціальної енергій поїзда для перетворення їх в енергію рекуперації. Деяке збільшення при інтенсивній рекуперації часу ходу не має суттєвого значення, так як за останні роки на залізницях України значно зменшились вантажопотік, швидкості руху, вимоги до підвищення пропускну здібності. У той же час економія електроенергії має особливе значення у зв'язку з її постійним подорожанням. Ідея інтенсивної рекуперації показана на рис.1 та рис.2.

На рис.1 та рис.2: криві 1 – гальмування з допомогою автоматичного гальма; криві 2 – гальмування по способу автора, коли на відрізку **ас** застосовується інтенсивна рекуперація.

Рис.1. Криві гальмування поїзда перед зупинкою.

Рис.2. Криві гальмування поїзда перед місцем обмеження швидкості.

Другий розділ присвячений теоретичному дослідженню інтенсивної рекуперації електровозів постійного струму у сучасних умовах роботи залізниць. Кількість енергії рекуперації A_p' у кВт·год (кіловат-годинах), одержуваної при гальмуванні від початкової швидкості v_n' до кінцевої v_k' пропонується визначати за відомою формулою:

(1)

де $(1 + \nu)$ - коефіцієнт інерції частин електровозу, які обертаються; ω_0' - основний питомий опір руху на ділянці гальмування, Н/кН; $i_{сер}'$ - середній уклон на ділянці гальмування на спуску, ‰; P, Q – відповідно вага електровоза та составу, т; a' - сповільнення, м/с²; η_p - коефіцієнт корисної дії рекуперуючого електровозу.

Пропонується режим, при якому реалізується максимально можлива сила рекуперативного гальмування B' для кожного значення швидкості в інтервалі від v_n' до v_k' і відповідному значенню a' , прийняти в якості базового. При менших значеннях a' значення A_p' зростає, але час ходу поїзда при рекуперації збільшується.

Для забезпечення цього режиму потрібно вести процес рекуперації по обмеженням гальмівних характеристик $B(v)$, де B - гальмівна сила при рекуперативному гальмуванні; v - швидкість руху.

Для досліджень бажано мати $B(v)$ у вигляді аналітичних виразів. Вид обмежень гальмівних характеристик електровозів ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1 дозволяє запропонувати записати аналітичний вираз для $B(v)$ слідує таким чином:

(2)

Штрих біля параметрів виразу (2) і далі по тексту показує, що йдеться про режим інтенсивної рекуперації. Для визначення коефіцієнтів b_0', b_1', b_2' застосовано метод найменших квадратів, який приводить до слідуєчій системи лінійних рівнянь:

(3)

Значення v_i' та B_i' знаходять по характеристикам рекуперативного гальмування для відповідних типу електровозу, напруги у контактній мережі, схеми з'єднання тягових двигунів. Питомі сила b' рекуперативного гальмування дорівнює $b' = \frac{(b_0' + b_1'v' + b_2'v'^2) \cdot 10^3}{(P + Q) \cdot g}$, Н/кН.

Значення сповільнення a' знаходимо із рівняння руху поїзду:

(4)

де $\xi = 0,00981$ - переводний коефіцієнт.

Приводиться методика визначення довжини l_p' ділянки інтенсивної рекуперації, на якій швидкість зменшується від v_n' до v_k' . Сповільнення можна також записати:

(5)

На основі формул (4) та (5) маємо:

(6)

Позначивши уклон, який забезпечує при заданих ω_0' та b' сповільнення, при якому на протязі ділянки рекуперації l_p' , швидкість знижується від v_n' до v_k' , через $i_{серрац}'$, із формули (6) отримуємо:

(7)

Дійсний середній уклон на ділянці рекуперації:

(8)

де n – кількість елементів K -го профілю на ділянці інтенсивної рекуперації; $i_1', i_2' \dots i_K'$ - уклон в ‰ елементів профілю на ділянці l_p' ; $l_1', l_2' \dots l_K'$ - довжини цих елементів, км.

Побудувавши $i_{серрац}' = f(l_p')$ та $i_{сердійсн}' = f(l_p')$ в одних осях, отримуємо у точці перетину графіків цих функцій значення $i_{серрац}' = i_{сердійсн}' = i_{сер}'$ (рис.3).

Показано, що на затяжних спусках у сучасних умовах доцільно вести поїзд у режимі: вибіг до встановлення швидкості – інтенсивна рекуперація від $v_n' = v_{дон}'$ до v_k' . Розроблені рекомендації по встановленню співвідношення між вагою поїзда та значенням уклону, на якому поїзд у режимі вибіга розганяється до заданої швидкості.

Рис.3. Визначення довжини ділянки інтенсивної рекуперації.

Отримані аналітичні вирази для характеристик рекуперативного гальмування електровозів ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1, тобто визначені коефіцієнти b_0', b_1', b_2' для формули (2) (див. табл.1).

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів b_0', b_1', b_2' для електровозів серій ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1 при $U_k = 3300$ В

Теоретичні розробки по визначенню аналітичних виразів характеристик $B(v)$ електровозів

ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1 можуть бути застосовані для ЕРС інших серій у теперішній час та у майбутньому. Для перевірки узгодження отриманих аналітичних виразів $B(v)$ з дійсними усередненими відповідними характеристиками застосовано критерій χ^2 (хі - квадрат) Пірсона.

Критерій згоди χ^2 у нашому випадку записується:

де $\chi_{спост}$ - спостережуваний критерій узгоди; B_i^o - дійсна сила рекуперативного гальмування при швидкості v_i , значення B_i^o знаходимо по дійсним усередненим залежностям $B(v)$; B_i^T - теоретична сила рекуперативного гальмування (визначається по аналітичним виразам для $B(v)$, отриманих автором); S - кількість групування параметру B_i ; i - порядковий номер інтервалу групування.

Теоретична характеристика $B(v)$ узгоджується з дійсною $B(v)$, тобто теоретична та дійсна характеристики $B(v)$ відрізняються незначно якщо: $\chi_{спост}^2 < \chi_{кр}^2$, де $\chi_{кр}^2$ - критерій Пірсона, який визначається по спеціальним таблицям, для чого потрібно знати кількість ступенів свободи розподілу $k = S - n$, де n - кількість незалежних умов розподілу. При розрахунках прийнято $S = 11$.

У нашому випадку накладаємо три умови: сума імовірностей по усім інтервалам групування повинна дорівнювати одиниці; середні значення розподілів повинні збігатися; дисперсії розподілів також повинні збігатися. При цих умовах $n = 3$, $k = 11 - 3 = 8$, і відхилення теоретичних значень B' від дійсних усереднених підпорядковуються нормальному закону.

Рівень значущості приймаємо $\alpha = 0,05$.

По спеціальним таблицям знайдено $\chi_{кр}^2(\alpha, k)$.

Результати перевірки наведені у табл.2.

Таблиця 2

Результати перевірки відповідності теоретичних та дійсних значень $B(v)$

Із табл.2 видно, що у всіх досліджуваних випадках: $\chi_{спост}^2 < \chi_{кр}^2$, що є умовою узгодження теоретичних та дійсних значень (знайдених по отриманим у роботі формулам) та дійсних значень гальмівної сили B_i .

Розроблені методики та рекомендації по визначенню полігону можливого застосування інтенсивної рекуперації.

Необхідною умовою належності дільниці до цього полігону є виконання умови: $l_{дійсн} \geq l'_{прац}$, де $l_{дійсн}$ - дійсна довжина конкретної дільниці колії.

Якщо рекуперація йде на уклоні, то ще повинно бути:

(9)

де ω'_0 – питомий опір руху поїзда.

Відомо що

(10)

де ω'_1 – питомий опір руху електровозу при рекуперації; ω''_{1j} – питомий опір руху вагонів j -го типу; Q_{Bj} – вага вагонів j -го типу; N – кількість типів вагонів у составі.

У першому наближенні при перевірці виконання умови (9) прийнято, що состав складається тільки з 4-х осних критих вагонів.

Якщо враховувати, що то $\omega'_0 \approx \omega''_1$, де ω''_1 – питомий опір руху 4-х осних критих вагонів на роликових підшипниках. Тоді умова (9) записується:

(11)

З урахуванням умови (11) побудовані залежності $(\omega''_1 + b') = f(v')$ – див. рис.4, які на практиці можуть бути використані при визначенні полігону інтенсивної рекуперації у першому наближенні.

Визначивши ділянки, на яких можлива інтенсивна рекуперація поїзда вагою Q , можна вимагати від локомотивних бригад обов'язкового застосування інтенсивної рекуперації на цих ділянках.

У третьому розділі проведено дослідження впливу значення напруги у контактній мережі на процес інтенсивної рекуперації.

З допомогою методів математичної статистики проведено аналіз статистичних даних про рівень напруги у контактній мережі U_κ під час рекуперації у реальних умовах. Відповідні статистичні дані зібрані в результаті дослідних поїздок на головному ході Придніпровської залізниці Чапліно - П'ятихатки. При цьому зареєстровано 181 вимір напруги U_κ у контактній мережі.

Встановлено, що цей рівень змінюється у межах 3400...3900 В.

Діапазон зареєстрованих значень U_κ поділено на інтервали групування. Кількість інтервалів n дорівнює $\frac{(u_{\kappa_{\max}} - u_{\kappa_{\min}})}{\Delta u_\kappa}$. Значення Δu_κ , виходячи з фізичних міркувань та досвіду прийнято 100 В, тобто маємо п'ять інтервалів групування.

Рис.4. Визначення ваги поїзда, при якій може бути здійсненна інтенсивна рекуперація на даній ділянці колії (електровоз ВЛ8).

Середнє значення напруги на струмоприймачі $\bar{u}_k$ визначено як: де n_i – кількість вимірів значень U_k у кожному інтервалі.

Математичне очікування MU_k визначено як, де p_{ii} – статистична імовірність, яка визначалась як відношення часу t_i рекуперації при напрузі, відповідної значенню U_k у даному інтервалі розподілу, до загального часу Σt_i рекуперації на досліджуваних ділянках колії.

Розходження середнього значення $\bar{u}_k = 3539...3557$ В на різних ділянках та його математичного очікування MU_k складає менше одного відсотка, що підтверджує коректність проведення експериментальних поїздок та вимірів U_k при цьому.

Вперше розроблена методика розрахунку гальмівних характеристик з урахуванням зміни магнітного потоку тягових двигунів під впливом зміни напруги у контактній мережі. Показано, що при інтенсивній рекуперації цей вплив в інтервалі швидкостей 80...65 км/год більш суттєвий, ніж в інтервалі 65...45 км/год.

У четвертому розділі досліджено вплив режиму рекуперації на значення енергії рекуперації при інтенсивному гальмуванні. Рекомендується проводити інтенсивну рекуперацію на уклонх при сповільненні 0,02...0,05 м/с², а не 0,1...0,4 м/с², як це рекомендувалось до виконання даної роботи. При цьому значення енергії рекуперації збільшується приблизно до 50-ти відсотків.

Рекомендований рівень напруги на струмоприймачі під час рекуперації не більш 3700 В. При однаковій різниці початкової і кінцевої швидкостей значення енергії рекуперації тим більше, чим вище початкова швидкість. Час ходу по ділянці при інтенсивній рекуперації збільшується в порівнянні з традиційною рекуперацією у допустимих з точки зору сучасних умов руху поїздів межах. При інтенсивній рекуперації відношення $I_{\text{я}}/I_3$ зменшується, що поліпшує умови роботи колекторного вузла тягових двигунів, де $I_{\text{я}}$ та I_3 - відповідно струм кола якоря та кола збудження.

Наведені результати експериментальних поїздок у реальних умовах, які підтверджують висновки теоретичних досліджень. Розбіжність значень енергії рекуперації отриманих шляхом розрахунків з використанням розроблених рекомендацій та при проведенні експериментальних поїздок не перевищує 15 %.

У п'ятому розділі показана техніко-економічна ефективності роботи та її практичне застосування. За рахунок планомірного застосування інтенсивної рекуперації тільки на Придніпровській залізниці економія електроенергії може скласти приблизно 4,2 відсотків від витрат енергії на тягу поїздів, що складає приблизно 6,44 млн. грн. на рік.

Рекуперація дає значну економію гальмівних колодок, бандажів колісних пар, підвищує безпеку руху. Відмітимо, що у теперішній час вартість однієї гальмівної колодки складає приб-

лизно 30 грн., а річна потреба цих колодок для залізниць України - декілька сот штук.

Результати досліджень рекомендуються в першу чергу застосовувати при експлуатації електровозів ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1, але можуть бути використані при розробці нових видів ЕРС з рекуперативним гальмуванням.

ВИСНОВКИ

В результаті виконаних теоретичних та практичних досліджень розроблені нові принципи підвищення ефективності рекуперації вантажних електровозів постійного струму, що є рішенням важливої науково-технічною задачі. Це є внеском в розвиток теорії електричної тяги та сприяє виконанню постанов уряду по економії електроенергії в Україні. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Показана життєва необхідність виконання робіт в галузі рекуперації електрорухомого складу, які в останні роки по різних причинах значно згорнуті. В теперішній час значення питомої енергії рекуперації на залізницях України зменшилося в 5-6 разів у порівнянні з 70-ми, 80-ми роками. Приблизно в шість разів у відсотковому численні від загальних витрат електроенергії на тягу зменшилася кількість цієї енергії на залізницях України в цілому. Враховуючи особливу важливість економії електроенергії, є доцільним використовувати для цього усі можливі засоби, для чого потрібно проводити відповідні дослідження.

2. Для збільшення кількості енергії рекуперації у сучасних умовах пропонується, крім традиційних методів рекуперації на уклоні при постійній швидкості, застосовувати постійно на визначених ділянках інтенсивне з точки зору збільшення енергії рекуперації гальмування із зменшенням швидкості перед зупинками і місцями обмеження швидкості замість електропневматичного гальмування на частці ділянки гальмування. Більш ефективно вказане гальмування на уклонах.

3. При інтенсивній рекуперації залишаються у силі такі переваги традиційного рекуперативного гальмування, як економія гальмівних колодок, зменшення зносу бандажів колісних пар, підвищення безпеки руху поїздів.

4. Запропонована математична модель для дослідження впливу умов руху та характеристик рухомого складу на значення рекуперативної енергії при гальмуванні із зниженням швидкості.

5. Отримані математичні вирази, які описують характеристики рекуперативного гальмування для електровозів серій ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1. Це дає можливість аналітично досліджувати зміну гальмівної сили в залежності від швидкості, що сприяє більш точному визначенню цієї сили в порівнянні з графічними методами, які традиційно застосовувались раніш, а це в свою чергу сприяє більш точному визначенню значень енергії рекуперації.

6. Встановлені співвідношення, за допомогою яких можна визначити раціональну довжину ділянки рекуперації із зниженням швидкості.

7. У сучасних умовах роботи залізниць, для електровозів ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1 рекомендуємий інтервал швидкостей при інтенсивній рекуперації визначен у межах від 80 км/год до 45 км/год. При однаковій різниці початкової і кінцевої швидкостей рекуперації значення енергії рекуперації тим більше, чим більша початкова швидкість. Збільшення часу ходу по ділянці при інтенсивній рекуперації збільшується, як правило, у допустимих межах в порівнянні з часом при традиційній рекуперації.

8. Встановлено значення уклонів, на яких рекуперація із зниженням швидкості при заданих вазі поїзда і початковій швидкості може бути здійсненна. Доведена ефективність рекуперації із зниженням швидкостей для легковісних поїздів (до 3000 т) на відносно малих уклонах (3...4 ‰).

9. Показано, що напруга на струмоприймачі рекуперуючого електровоза не повинна перевищувати 3600...3700 В.

10. Досліджено вплив зміни магнітного потоку тягових двигунів при зміні напруги у контактній мережі на характеристики рекуперативного гальмування. Показано, що при інтенсивній рекуперації вплив зміни магнітного потоку двигунів в інтервалі швидкостей 80...65 км/год більший, ніж в інтервалі 65...45 км/год.

11. Доведено, що зменшення сповільнення при гальмуванні порівняно з рекомендованими до цієї роботи його значеннями $0,1...0,4 \text{ м/с}^2$ суттєво збільшує кількість енергії рекуперації при гальмуванні на спуску. Рекомендується проводити на спусках інтенсивне гальмування із сповільненням $0,02...0...0,05 \text{ м/с}^2$, якщо це допускається умовами руху по фактору часу.

12. При рекуперації із сповільненням $0,02...0...0,05 \text{ м/с}^2$ для поїздів вагою до 3500 т відношення струму якоря до струму збудження значно менше максимально допустимого по умовам комутації, що сприяє поліпшенню роботи колекторно-щіткового вузла двигунів.

13. Достовірність отриманих результатів теоретичних досліджень підтверджується доброю збіжністю значень енергії рекуперації, отриманих розрахунковим шляхом і при експериментальних поїздках у реальних умовах (відхилення не більш $\pm 15 \%$).

14. При відповідній організації руху поїздів у сучасних умовах можна отримати без додаткових матеріальних витрат суттєве збільшення кількості енергії рекуперації за рахунок застосування інтенсивної рекуперації. Так для Придніпровської залізниці цей показник складає приблизно 4,2 відсотка від витрат енергії на тягу поїздів

15. Враховуючи можливості сучасних ЕОМ та надзвичайну важливість економії електроенергії, доцільно у перспективі вирішити задачу видачі машиністу перед кожною поїздкою енергооптимальних режимних карт з урахуванням режимів тяги, вибігу, гальмування (включаючи інтенсивну рекуперацію), ваги поїзда та інших факторів.

Основні положення та результати дисертації опубліковані у таких працях:

1. Сулима С.Д. Рекуперативное торможение в современных условиях движения поездов на железных дорогах Украины. // Транспорт. Сборник научных трудов Днепропетровского государственного технического университета железнодорожного транспорта. - Днепропетровск, Наука і освіта - 1999. - Вып.1. - С.60-63.
2. Сулима С.Д. Увеличение количества рекуперированной энергии в современных условиях. // Транспорт. Сборник научных трудов Днепропетровского государственного технического университета железнодорожного транспорта. - Днепропетровск, Наука і освіта - 2000. - Вып.3. - С.60-64.
3. Сулима С.Д. Математическая модель для расчета рационального режима рекуперации на спуске. // Транспорт. Сборник научных трудов Днепропетровского государственного технического университета железнодорожного транспорта. - Днепропетровск, Наука і освіта - 2001. - Вып.7. - С.100-104.
4. Дубинец Л.В., Сулима С.Д. Рекуперация поездов с учетом реального напряжения контактной сети. // Сборник научных трудов Национальной горной академии Украины - Днепропетровск - 2000. - № 64. - С.3-6.
5. Сулима С.Д. Выбор участков для интенсивного рекуперативного торможения. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. пр. – Харків, ХДПУ - 2001. - Тематичний випуск 10. - С.372-374.
6. Сулима С.Д. Увеличение количества рекуперированной энергии на железных дорогах. // Тези X Міжнародної конференції "Проблеми механіки залізничного транспорту. Динаміка, надійність та безвідказність рухомого складу." – Дніпропетровськ: ДПТ - 2000. – С.50-51.
7. Сулима С.Д. Рациональные режимы рекуперации на железных дорогах Украины в настоящее время. // Тезисы III-ей Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электроподвижного состава". – Новочеркасск: ВЭЛНИИ. - 2000. - С.224-225.

Особистий внесок здобувача в спільних публікаціях, що відбивають основні положення дисертації

Всі публікації, крім [4], без співавторів.

У публікації [4] автору належить ідея і методика визначення раціонального рівня напруги в контактній мережі при рекуперації шляхом аналізу статистичних даних дослідних поїздок.

АНОТАЦІЯ

Суліма С.Д. Підвищення ефективності рекуперативного гальмування електровозів постійного струму. – Рукопис.

Дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – Електротранспорт. Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту, Дніпропетровськ, 2001.

Дисертація присвячена збільшенню енергії рекуперації вантажних електровозів постійного струму.

У роботі пропонується підвищити ефективність рекуперативного гальмування електровозів постійного струму за рахунок планомірного застосування рекуперації із зменшенням швидкості перед зупинками та місцями обмеження швидкості (інтенсивна рекуперація), особливо на уклоні.

Показана доцільність застосування у цьому випадку рекуперації замість електропневматичного гальмування на частці дільниці гальмування. Розроблені математична модель для дослідження режиму інтенсивної рекуперації в сучасних умовах роботи залізниць України, методика вибору відповідних дільниць, знайдені аналітичні вирази для характеристик рекуперативного гальмування електровозів ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1.

Досліджено вплив зміни напруги у контактній мережі на значення магнітного потоку тягових двигунів і відповідно на значення енергії рекуперації.

Проведена експериментальна перевірка у реальних умовах результатів теоретичних досліджень. Збіжність теоретичних і практичних результатів задовільна. Наведені рекомендації по практичному застосуванню результатів роботи та показана техніко-економічна ефективність їх використання.

Ключові слова: інтенсивна рекуперація, характеристика рекуперативного гальмування, зміна напруги у контактній мережі, магнітний потік тягових двигунів, кількість енергії рекуперації.

АННОТАЦІЯ

Суліма С.Д. Повышение эффективности рекуперативного торможения электровозов постоянного тока. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – Электротранспорт. – Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта, 2001.

Диссертация посвящена увеличению энергии рекуперации грузовых электровозов постоянного тока. В работе проведен анализ имеющегося опыта рекуперации с точки зрения современных условий работы железных дорог Украины. Предложено уделить внимание рекуперативному

торможению перед остановками и местами ограничения скорости и особенно на спусках.

Предлагается уменьшать в этих случаях скорость от начальной до заданной конечной, как правило, с помощью рекуперации (интенсивная рекуперация), и только после достижения конечной скорости применять электропневматический тормоз. При этом эффективно, с точки зрения увеличения энергии рекуперации, используется кинетическая и потенциальная (на спусках) энергия поезда, включая и относительно легкие (до 3000 т) поезда. Предложена методика определения длины участка интенсивной рекуперации.

Найдены аналитические выражения для характеристик рекуперативного торможения электровозов ВЛ8, ВЛ10, ДЭ1, что является удобным при выполнении исследований. С помощью критерия Пирсона доказана адекватность полученных выражений реальным усредненным характеристикам, полученных графическим путем.

Разработана математическая модель для исследования режима интенсивной рекуперации, с помощью которой получены рекомендации по определению длин участков выбега, рекуперации на затяжных спусках, влияния значения замедления и других параметров на величину рекуперированной энергии.

Исследовано влияние изменения напряжения в контактной сети на значение магнитного потока тяговых двигателей и соответственно на количество энергии рекуперации. Предложена методика пересчета характеристик рекуперативного торможения с учетом этого изменения магнитного потока.

Установлено, что влияние изменения потока более существенно в интервале скоростей 80...65 км/ч, чем в 65...45 км/ч.

Проведена экспериментальная проверка в реальных условиях результатов теоретических исследований путем проведения опытных поездок на Приднепровской железной дороге. Сходимость теоретических и практических результатов удовлетворительная. Даны рекомендации по практическому применению результатов исследований и показана технико-экономическая эффективность их использования.

Ключевые слова: интенсивная рекуперация, характеристики рекуперативного торможения, изменения напряжения в контактной сети, магнитный поток тяговых двигателей, количество энергии рекуперации.

ABSTRACT

Sulima S.D. Raising the recuperative braking efficiency of the electric locomotives on direct current. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a

speciality 05.22.09 – “Electric Transport”. Dnipropetrovsk state technical university of railway transport, Dnipropetrovsk, 2001.

The dissertation is devoted to raising of recuperative energy of cargo electric locomotives on direct current. In the paper the analysis of available experience in recuperation is given concerning the modern working conditions of railways in Ukraine. It is offered to give attention recuperative braking before stoppings and the sections of speed restrictions and especially on descents.

It is proposed to reduce the speed in these cases from the initial one to the given final one with the help of recuperation's (intensive recuperation), and only after reaching the final speed to apply an electropneumatic brake. It is stated that concerning the recuperation energy magnification the kinetic and potential (on descents) energy of a train, including relatively light (up to 3000 ton) trains? Is used efficiently. The technique for definition the length of intensive recuperation section is suggested.

The mathematical model for the investigation of intensive recuperation is developed. The recommendations for defining the length of coasting sections, the recuperation on long descents, the influence of deceleration value and of other parameters on recuperative energy are given.

The experimental checking of theoretical investigations was conducted in the real conditions by realization of experimental trips on the Pridneprovsky railway. The convergence of the theoretical and practical outcomes is satisfactory. The recommendations for practical application of the investigation outcomes are given and the technological effectiveness of their application is shown.

Key words: intensive recuperation, performances recuperative braking, modification voltage in contact system, magnetic stream of traction engine, amount of recuperative energy.

Суліма Станіслав Дмитрович

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ
ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Автореферат

Підписано до друку “ ____ ” _____ 200_ р.

Формат 60x84 1/16. Папір для множильних апаратів. Різограф.

Ум. др. арк. 1,0. Обл.-вид. л.1,0. Тираж 100 екз.

Замовлення № _____. Безкоштовно.

Дніпропетровський державний технічний університет
залізничного транспорту

Адреса університету і ділянки оперативної поліграфії:
49010, Дніпропетровськ, вул. Ак. В.А.Лазаряна 2.