

**МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

УСТИМЕНКО ДМИТРО ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.337.522

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГИ ПОЇЗДІВ ШЛЯХОМ
УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ**

Спеціальність 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

АВТОРЕФЕРАТ

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

Дніпропетровськ – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизованого електропривода Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

ДУБИНЕЦЬ Леонід Вікторович,

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України, завідуючий кафедрою автоматизованого електропривода.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

САДОВОЙ Олександр Валентинович

Дніпродзержинський державний технічний університет Міністерства освіти і науки України, завідуючий кафедрою електрообладнання.

кандидат технічних наук, доцент

ВІСІН Микола Григорович

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України, доцент кафедри електрорухомого складу.

Провідна установа:

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, кафедра „Залізничний транспорт”, Міністерства освіти і науки України, м. Луганськ.

Захист відбудеться 02.06.2006 р. о 14-10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д08.820.02 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Ак. Лазаряна, 2, ауд.314.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Автореферат розісланий 17.05.2006 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

доктор технічних наук, професор

І.В. ЖУКОВИЦЬКИЙ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Рекуперація завжди є суттєвим джерелом економії електроенергії на тягу поїздів. В залежності від умов роботи залізниць та характеристик рухомого складу на кожному етапі роботи електрифікованих залізниць були свої оцінки ефективності рекуперативного гальмування та рекомендації до його застосування. За останні роки умови роботи залізниць України значно змінилися: підвищилися питомі експлуатаційні витрати (у тому числі різко зросла і продовжує збільшуватись вартість електроенергії на тягу поїздів), суттєво зменшилась кількість важковагових поїздів. Значна кількість поїздів має вагу до 3000 т. Аналіз динаміки зростання цін на електричну енергію на прикладі Придніпровської залізниці показує, що тільки в період з 2002 року по 2004 рік вартість однієї кВт·год електроенергії на тягу поїздів зросла з 0,113 грн до 0,164 грн, тобто збільшення склало 31%. Вартість електричної енергії на тягу поїздів складає суттєву частку в собівартості перевезень, а ситуація на ринку енергоносіїв України показує, що така тенденція буде спостерігатися і в майбутньому. Тому зменшення цієї частки в собівартості перевезень може значно підвищити ефективність роботи залізничного транспорту. Одним із шляхів вирішення цієї задачі є раціональне застосування рекуперації з урахуванням сучасних умов роботи залізниць України та розвитку сучасної елементної бази для побудови систем керування процесом рекуперативного гальмування.

У цих умовах актуальними є дослідження з метою забезпечення режиму руху поїзда, при якому гарантовано надійне рекуперативне гальмування на ділянці перед місцем обмеження швидкості при умові дотримання точно графікового часу. Такий режим у роботі позначено терміном – „раціональний”. Також дослідження пов’язані з розробкою відповідних систем керування процесом рекуперації на базі сучасної мікроконтролерної техніки, що суттєво розширює можливості таких систем. Дослідження у дисертації проведені відносно електровозів постійного струму, але основні висновки та рекомендації можуть бути використані і для електровозів змінного струму.

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

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у відповідності з головними напрямками розвитку науки та техніки, постановою Кабінету Міністрів України “Про заходи державної підтримки залізничного транспорту”, щорічними координаційними планами НІОКР “Укрзалізниця”, програмою “Електропостачання на залізничному транспорті України на період 1996-2010 роки”, схваленої рішенням техніко-економічної ради Укрзалізниці від 26.06.1996 р., концепцією і програмою реструктуризації на залізничному транспорті України, які підтверджені рішеннями колегії Міністерства транспорту України відповідно 18.06.1997 р. (протокол №14) і 18.08.1998 р. (протокол №30).

Обраний напрямок досліджень зв’язаний з планами виконання робіт в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені В. Лазаряна: “Разработка рекомендаций по повышению эффективности рекуперативного торможения на локомотивах в современных условиях движения поездов” (договір НТО/Т-09-00/НЮ-322, № ДР 0100U004126), “Разработка про-

граммного забезпечення для определения рациональных режимов рекуперации” (договір НТО/Т-34-00/НЮ-351, № ДР 0100U004127), “Теоретичні та експериментальні дослідження уніфікації релейної апаратури на рухомому складі залізниць” (договір № 24.03.00.03, № ДР 0100U004125).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності тяги поїздів у сучасних умовах роботи залізниць України за рахунок точного забезпечення раціонального режиму рекуперації при гальмуванні із зменшенням швидкості шляхом удосконалення системи рекуперативного гальмування електровозів з використанням широких можливостей сучасної мікропроцесорної техніки.

Для досягнення поставленої мети в дисертації вирішено наступні основні задачі:

1. Провести аналіз існуючого досвіду та схем рекуперації з точки зору сучасних умов роботи залізничного транспорту.
2. Визначити залежність гальмівної сили від швидкості, реалізація якої забезпечує точне виконання раціонального режиму рекуперації при гальмуванні із зменшенням швидкості руху. Дослідити вплив параметрів руху поїзда на можливість забезпечення заданого зменшення швидкості за рахунок тільки рекуперативного гальмування.
3. Розробити загальну структуру системи автоматичного керування рекуперативним гальмуванням (САК РГ) з використанням широких можливостей сучасної елементної бази для реалізації раціонального режиму руху поїзда під час рекуперації із зменшенням швидкості.
4. Створити математичну модель для дослідження стійкості і перехідних процесів в розробленій системі. Провести аналіз перехідних процесів і дати оцінку стійкості в розробленій системі.
5. Розробити рекомендації по побудові системи керування рекуперативним гальмуванням на базі сучасних мікроконтролерів, яка в автоматичному режимі забезпечує раціональний режим руху поїзда.

Об'єкт дослідження – процес перевезень на електрифікованих залізницях України.

Предмет дослідження – режими та системи керування рекуперативним гальмуванням електровозів, що дозволяють забезпечити підвищення ефективності тяги поїздів.

Методи дослідження – Для вирішення поставлених у дисертації задач застосовані: аналіз літературних джерел і узагальнення досліджень, виконаних раніше, по рекуперації на залізницях та аналіз параметрів сучасних мікроконтролерів; основні положення теорії електричної тяги та теорії автоматичного керування для визначення раціонального режиму руху поїзда під час рекуперативного гальмування із зменшенням швидкості та розробки системи керування, яка забезпечує цей процес в автоматичному режимі; математичне моделювання для дослідження перехідних процесів у системах електровозів під час рекуперації з використанням незалежних методів Рунге-Кутта та Булірша-Штера; критерій стійкості Рауса-Гурвиця для визначення стійкості розробленої САК РГ.

Ефективність запропонованого принципу рекуперативного гальмування з точки зору збільшення енергії рекуперації перевірено в реальних умовах на При-

дніпровській залізниці, а працездатність блоків розробленої САР РГ – в лабораторних умовах.

Використання вищевказаних достовірних розділів математики, теорій електричної тяги та автоматичного керування, дослідження математичних моделей за допомогою сучасної комп'ютерної техніки, позитивні результати експериментальних досліджень 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. Встановлені раціональний режим рекуперації та аналітична залежність гальмівної сили від швидкості для реалізації цього режиму при гальмуванні із зменшенням швидкості руху поїзда.
2. Встановлені співвідношення між значеннями ваги поїзда та ухилу, при яких може бути реалізований раціональний режим рекуперації перед місцем обмеження швидкості.
3. Розроблена математична модель для дослідження перехідних процесів в схемах електровоза та оцінки стійкості удосконаленої автором САК РГ.

Отримані нові науково обґрунтовані результати по раціональному рекуперативному гальмуванню та автоматичному його забезпеченню є суттєвими для розвитку наукових знань у галузі електровозобудування.

Практичне значення одержаних результатів. Запропонований спосіб керування рекуперативним гальмуванням, загальна структура системи автоматичного регулювання, рекомендації по застосуванню мікроконтролерів та інші результати дозволяють:

1. Підвищити точність, надійність, швидкодію автоматичних систем керування рекуперативним гальмуванням електровозів, що сприяє підвищенню економії електроенергії при здійсненні процесу перевезень.
2. Розширити полігон застосування рекуперативного гальмування за рахунок більш ефективного його використання при гальмуванні перед місцями постійного зниження швидкості руху поїздів.
3. Забезпечити повністю автоматичне керування процесом рекуперації за рахунок введення в систему керування блоку початкових умов та розрахункового пристрою.
4. Вдосконалити існуючі системи керування процесом рекуперації на діючих електровозах, що дозволяє також покращити традиційні переваги рекуперативного гальмування: зменшити знос бандажів колісних пар і гальмівних колодок.
5. Підвищити безпеку руху поїздів, оскільки функції по формуванню залежності гальмівної сили від швидкості виконуються системою автоматики, а не машиністом як у діючих системах.

Результати досліджень впроваджені на Придніпровській залізниці, на державному підприємстві Науково-виробничий комплекс “Електровозобудування” (ДП НВК “Електровозобудування”), в учбовому процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно сформулював ціль, задачі

дослідження, наукові положення, провів теоретичні та експериментальні дослідження. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Крім цього, в публікаціях, в яких відображено основні результати дисертації та які написані у співавторстві, здобувачу належать: в [1] – чисельна оцінка ефективності безступінчастого способу регулювання гальмівного зусилля на електровозі ВЛ8; [2] – розробка функціональної схеми САР РГ для електровозів постійного струму і вивід аналітичного виразу гальмівної характеристики в відповідності з вибраною формою, а також дослідження перехідних режимів.

Роботи [3-8] написані автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати доповідались й отримали схвалення на наступних Міжнародних науково-технічних конференціях: “Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації”, Кременчук, 2003 р.; “Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика”, Харків, 2003 р.; “Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації”, Кременчук 2004 р.; на засіданні технічної ради служби локомотивного господарства Придніпровської залізниці, Дніпропетровськ, 2004 р.; на семінарі Інституту електродинаміки Національної академії України “Перетворювачі енергії у технологічних процесах транспорту”, Дніпропетровськ, 2004 р.; на науково-технічній раді ДП НВК “Електровозобудування”, Дніпропетровськ, 2004 р; на загальному семінарі кафедр автоматизованого електропривода, електрорухомого складу, локомотивів, теоретичних основ електротехніки Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2005 р.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 7 наукових працях у фахових виданнях. Крім того, отримано деклараційний патент України на винахід №70566 МПК 7 В60L7/10, В60L7/22, В60L15/20.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п’яти розділів, висновків, що викладені на 121 сторінках машинописного тексту і які містять 44 рисунків і 5 таблиць, переліку літературних джерел із 91 найменувань, що викладений на 8 сторінках, 9 додатків на 70 сторінках. Рисунки, які розміщені на окремих сторінках дисертації, займають одну сторінку. Повний об’єм дисертації складає 199 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність досліджень, сформульована мета і завдання досліджень, приведені основні наукові положення та результати, винесені на захист, а також відомості про практичне значення результатів роботи, їх апробацію і публікацію матеріалів дослідження.

У першому розділі показано сучасний стан досліджуваної задачі. Проведено аналіз схем збудження тягових двигунів в режимі рекуперативного гальмування. Показано, що при всіх інших умовах перевагу мають схеми з незалежним збудженням та живленням їх від статичних перетворювачів. Вони мають високий ККД, високу експлуатаційну надійність, дозволяють забезпечити плавність процесу гальмування, простоту і зручність керування гальмом.

Проведено аналіз існуючих систем керування рекуперативним гальмуванням. У всіх розглянутих варіантах систем автоматичного керування рекуперативним гальмуванням необхідне значення уставки гальмівного струму вибирається і встановлюється машиністом „вручну”, що в більшості випадків призводить до відхилення від раціонального режиму рекуперації. Тому необхідно удосконалити систему автоматичного керування рекуперативним гальмуванням з метою забезпечення формування необхідної гальмівної характеристики $B(V)$ в автоматичному режимі для отримання раціонального режиму руху поїзда при цьому.

Переважна частина залізниць України має рівнинно-горбистий профіль. Середня вага вантажного поїзда по залізницям України станом на 2002 рік складала 3268 т. При цьому об'єктивно збільшується імовірність зменшення швидкості руху поїзда тільки за рахунок рекуперативного гальма.

Рисунок 1 – Варіанти рекуперації на ділянці „ab”

Точка „b” відповідає початку ділянки шляху, на якій встановлено обмеження швидкості до значення V_k . Точка „a” відповідає початку ділянки рекуперативного гальмування, початкова швидкість $V_{\Pi} > V_k$. Для забезпечення зменшення швидкості руху поїзда на вказаній ділянці „ab” повинна бути виконана умова:

$$w_0 + \frac{B \cdot 10^3}{(P + Q) \cdot g} > i, \quad (1)$$

де B - гальмівна сила, що розвивається електровозом, кН;
 P, Q - відповідно маса електровозу та складу поїзда, кН;
 $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - прискорення вільного падіння.

При заданих P, Q, i умова (1) може бути забезпечена шляхом регулювання значення гальмівної сили B при відповідному значенні питомого опору рухові поїзда для певної швидкості.

У зв'язку з вищевикладеним у роботі проведені теоретичні та експериментальні дослідження з метою вирішення задачі забезпечення підвищення ефективності тяги за рахунок застосування раціонального режиму рекуперації, тобто зменшення швидкості V легковагових поїздів на відносно малих ухилах на ділянках перед місцями обмеження швидкості від початкового значення V_{Π} точно до кінцевого V_k виключно за рахунок рекуперативного гальмування при точному дотриманні графікового часу руху на вказаній ділянці, шляхом удосконалення системи рекуперативного гальмування, що дозволяє точно формувати потрібну залежність гальмівної сили від швидкості $B(V)$.

Другий розділ присвячений дослідженню режимів рекуперативного гальмування із зменшенням швидкості руху; встановлено співвідношення між параметрами, що характеризують режим руху, використання якого дозволяє сформулювати гальмівну характеристику для забезпечення раціонального режиму рекупе-

рації; показано, що діючі системи автоматичного керування рекуперативним гальмуванням не забезпечують раціональний режим гальмування.

Для забезпечення гальмування поїзда з метою зменшення швидкості руху потрібно виконати умову (1), для чого у процесі рекуперації необхідно формувати відповідну залежність гальмівної сили від швидкості $B(V)$ для заданих значень маси поїзда, ухилу та з урахуванням зміни основного питомого опору рухові w_0 . Така залежність може бути отримана із рівняння руху поїзда при рекуперативному гальмуванні:

$$a_c = \frac{\xi}{(1+\nu)} \cdot (i_c - w_0 - b) = \frac{\xi}{(1+\nu)} \cdot (i_c - (w_0 + b)), \quad (2)$$

де $\xi = 0,00981$ - перевідний коефіцієнт;

$(1+\nu) = 1,06$ - коефіцієнт інерції обертових частин;

i_c - середнє значення ухилу на ділянці гальмування, Н/кН;

a_c - середнє значення уповільнення при рекуперативному гальмуванні на ділянці S від V_{Π} до V_K при заданому графіковому часі $t_{\text{ГРАФ}}$, м/с²;

b - питоме значення гальмівної сили, Н/кН.

З іншого боку величина уповільнення може бути визначена, як:

$$a_c = \frac{(V_K - V_{\Pi})^2}{2 \cdot (S - V_{\Pi} \cdot t_{\text{ГРАФ}})} \quad (3)$$

Підставивши у вираз (2) формулу для a_c (3) визначимо питоме значення гальмівної сили:

$$b = i_c - w_0 - \left(\frac{(V_K - V_{\Pi})^2}{2 \cdot (S - V_{\Pi} \cdot t_{\text{ГРАФ}})} \cdot \frac{(1+\nu)}{\xi} \right) \quad (4)$$

Значення гальмівної сили:

$$B = \frac{b \cdot (P + Q) \cdot g}{10^3} \quad (5)$$

Вираз (4) дозволяє визначити середнє значення b для інтервалу швидкостей від V_{Π} до V_K . Замінивши у виразі (4) значення V_{Π} поточним значенням швидкості V , а також з урахуванням виразу (5), отримуємо аналітичну залежність для визначення необхідної функції $B(V)$:

$$B = \left[i_c - w_0 - \left(\frac{(V_K - V)^2}{2 \cdot (S - V \cdot t_{\text{ГРАФ}})} \cdot \frac{(1+\nu)}{\xi} \right) \right] \cdot \frac{(P + Q) \cdot g}{10^3} \quad (6)$$

В існуючих системах керування рекуперативним гальмуванням функції вибору початкового значення гальмівного зусилля, а також формування характеристики $B(V)$ покладені на машиніста. Тому на заданій ділянці „ ab ” (рис. 1)

можливо декілька варіантів зниження швидкості руху тільки за рахунок рекуперативного гальмування:

1. Гальмівне зусилля змінюється таким чином, що поїзд рівномірно уповільнюється від початкової швидкості V_{Π} до кінцевої V_K з $a_C = a = const$. При цьому точно виконується графіковий час руху $t_{\text{ГРАФ}}$ на ділянці довжиною S .
2. Значення гальмівного зусилля на початку гальмування вибрано таким чином, що поїзд уповільнюється з $a_{AC} < a$, тому в точці „С” машиніст повинен скоригувати значення гальмівної сили, щоб у місці обмеження швидкості мати швидкість $V \leq V_K = V_{\text{ОБМ}}$. Так як машиніст повинен слідкувати за виконанням графіка руху, то в точці „С” потрібно збільшити гальмівну силу настільки, щоб $t = t_{\text{ГРАФ}}$. За таких обставин швидкість поїзда в кінці ділянки гальмування буде мати значення $V < V_{\text{ОБМ}}$ (точка „D” рис. 2), а величина уповільнення на ділянці „CD” $a_{CD} \neq a_{AC}$. Оскільки згідно графіка руху швидкість поїзда в точці „D” повинна бути приблизно рівною $V_{\text{ОБМ}}$, то за другим варіантом на подальших ділянках потрібно компенсувати величину $\Delta V = V_{\text{ОБМ}} - V_D$, що призведе до додаткових витрат електроенергії.
3. Величина гальмівного зусилля на початку гальмування вибрана таким чином, що величина уповільнення поїзда має значення $a_{AE} > a$, тому в точці „Е” шляху (рис. 2 б, характеристика 3) швидкість руху буде мати значення $V_E = V_{\text{ОБМ}}$. В цьому випадкові існуючі системи керування автоматично, без участі машиніста, коригують гальмівне зусилля B і електровоз переходить в режим рекуперативного гальмування з підтриманням сталої швидкості (ділянка „EF”), а величина сповільнення має значення $a_{EF} = 0$. Оскільки середня швидкість руху за третім варіантом на ділянці S дещо менша від середньої по графіку в точку „F”, яка є кінцем гальмівного шляху, поїзд прийде з запізненням на величину $\Delta t = t_{AF} - t_{\text{ГРАФ}}$. Очевидно, що величину цього запізнення Δt можливо компенсувати лише підвищенням середньої швидкості руху на подальших ділянках, що як і за другим варіантом призводить до додаткових витрат електроенергії.

Рисунок 2 – Варіанти залежностей $t(V)$, $S(V)$ при ручному виборі гальмівного: 1 - $a = const$; 2 - $a_{AC} \neq a_{CD}$; 3 - $a_{AE} \neq a_{EF}$

Згідно виразу (6) якісний вигляд гальмівних характеристик для вказаних на рис. 2 варіантів зниження швидкості наведено на рис. 3: характеристика 1 - $a = a_C = const$; характеристика 2 - $a_{AC} \neq a_{CD}$; характеристика 3 - $a_{AE} \neq a_{EF}$, $a_{EF} = 0$.

Гальмівна характеристика, отримана за виразом (6) повинна знаходитись у межах діючих обмежень гальмівної характеристики даного типу електровоза.

З розглянутих трьох варіантів зниження швидкості з використанням тільки рекуперативного гальмування при існуючих системах керування вірогідними є другий та третій. Гальмування по першому варіантові, який дозволяє точно виконати графік практично неможливе, оскільки вибір початкового значення гальмівної сили цілком покладено на машиніста. Машиніст, як правило, при діючих системах керування не має змоги з необхідною швидкодією врахувати потрібне значення гальмівного зусилля.

Рисунок 3 – Якісний вигляд гальмівних характеристик для варіантів зниження швидкості при існуючих системах керування

Проведені дослідження значень Δt та ΔV при відхиленні від необхідного значення гальмівної сили при гальмуванні на деякій розрахунковій ділянці гальмування. Розрахункова ділянка рекуперативного гальмування має наступні параметри:

- довжина ділянки рекуперативного гальмування $S = 2400$ м;
- час ходу по ділянці $t_{\text{ГРАФ}} = 98,7$ с;
- середня величина ухилу $i_c = 4\%$;

В роботі в якості базового для чисельних розрахунків прийнято електровоз з електричними та механічними параметрами аналогічними існуючому електровозу постійного струму ДЕ1 (потужність тягового двигуна ЕД-141У1 785 кВт, кількість двигунів – 8).

Дослідження автора показали, що для типових значень ухилів та масі поїзда до 2500 т раціональне значення сповільнення знаходиться у межах: $a = 0,05..0,1$ м/с². Визначені значення Δt для третього варіанту зниження швидкості (характеристика 3, рис. 2 а, б) при різних значеннях маси складу поїзда, середнє значення Δt складає 7,2% від графікового часу руху на даній ділянці S .

Також отримані значення кінцевої швидкості для другого варіанту зниження швидкості руху (характеристика 2, рис. 2 а, б) при різних значеннях маси складу поїзда, в середньому швидкість в кінці ділянки гальмування на 8% менше від заданої.

Оскільки при використанні існуючих систем автоматичного керування, практично, неможливе точне забезпечення гальмування на заданій ділянці за графіком, тому необхідно для вирішення задачі підвищення ефективності використання рекуперативного гальмування функцію вибору уставки гальмівної сили (струму рекуперації) передати від машиніста до системи керування, тобто забезпечити повністю автоматичне керування процесом рекуперації при цьому.

При автоматичному формуванні гальмівної характеристики $B(V)$ на ділянці довжиною S з графіковим часом руху $t_{\text{ГРАФ}}$ для зменшення швидкості від $V_{\text{П}}$ до $V_{\text{К}}$ можливо декілька варіантів (рис. 4 а, б):

1. Як і при діючих системах керування гальмівне зусилля, розраховане в

певному блоці удосконаленої системи по формулі (6) змінюється таким чином, що поїзд рівномірно сповільнюється від початкової швидкості V_{Π} до кінцевої V_K з $a_C = a = const$.

2. Початкове гальмівне зусилля, розраховане за формулою (6) для V_{Π} , має значення дещо менше, ніж для першого варіанту, тому поїзд уповільнюється з $a_{AB} < a$. В точці „В” шляху, для виконання початкових умов, система повинна скоригувати величину гальмівного зусилля таким чином, щоб швидкість зменшувалась більш інтенсивно, тобто $a_{BC} > a$. В точці „С” поїзд буде мати швидкість V_C , яка буде меншою від швидкості у цій же точці шляху за першим варіантом. Тому для дотримання графіку руху та виконання обмеження, необхідно в точці „С” зменшити гальмівну силу таким чином, щоб у точці „D” поїзд мав швидкість $V = V_K$ (рис. 4), а час $t = t_{\text{ГРАФ}}$.

3. Початкове гальмівне зусилля, розраховане за формулою (6), має значення дещо більше, ніж потрібно для реалізації рекуперативного гальмування з уповільненням a , тому поїзд уповільнюється з $a_{AE} > a$. В точці „Е” шляху, для виконання початкових умов, система повинна скоригувати величину гальмівного зусилля таким чином, щоб швидкість зменшувалась менш інтенсивно, тобто $a_{EG} < a$. В точці „G” шляху поїзд буде мати швидкість V_G , яка буде більшою від швидкості у цій же точці шляху за першим варіантом. Тому для дотримання графіку руху та виконання обмеження по швидкості необхідно в точці „G” шляху збільшити гальмівну силу таким чином, щоб у точці „D” поїзд мав швидкість $V = V_K$ (рис. 4), а час $t = t_{\text{ГРАФ}}$.

Всі вказані три варіанти рекуперативного гальмування забезпечують виконання графіку руху ($t = t_{\text{ГРАФ}}$) і дозволяють мати швидкість в кінці ділянки гальмування S рівною заданому значенню V_K .

Згідно виразу (6) та з урахуванням форми характеристик $t(V)$, $S(V)$ (рис. 4) якісний вигляд гальмівних характеристик для розглянутих трьох варіантів зниження швидкості наведено на рис. 5: характеристика 1 - $a = a_C = const$; характеристика 2 - $a_{AC} \neq a_{CD}$; характеристика 3 - $a_{AE} \neq a_{EF}$, $a_{EF} = 0$. Гальмівна характеристика повинна знаходитись у межах діючих обмежень гальмівної характеристики даного типу електровоза.

Рисунок 4 – Варіанти залежностей $t(V)$, $S(V)$ при автоматичному формуванні $B(V)$ для заданих $t_{\text{ГРАФ}}$, S , V_{Π} , V_K

Рисунок 5 – Якісний вигляд гальмівних характеристик для варіантів зниження швидкості при автоматичному розрахунку $B(V)$

З рис. 5 видно, що найпростішим варіантом формування гальмівної сили при рекуперації у повністю автоматичному режимі є перший варіант. Також значення гальмівної сили на відрізках від V_{II} до V_E та V_G до V_K для третього варіанту і значення гальмівної сили на відрізку від V_B до V_C для другого варіанту при деяких значеннях маси поїзда та ухилу можуть виходити за обмеження (криві 4, 5, 6 на рис. 5) гальмівної характеристики $B(V)$ електровозу, тоді як $B(V)$ за першим варіантом по умовам роботи буде знаходитись в межах діючих обмежень.

Таким чином необхідно мати надійну САК РГ, яка, на відміну від діючих систем, повинна забезпечити з достатньою швидкістю та точністю розрахунків для реалізації першого варіанту зниження швидкості ($a = const$ на всій ділянці).

При використанні тільки рекуперативного гальмування для зменшення швидкості руху на можливість його реалізації найбільший вплив мають вага поїзда, величина ухилу на якому відбувається гальмування, значення швидкості на початку гальмування. Також на можливість реалізації такого гальмування впливає значення сповільнення, яке обумовлене довжиною ділянки та графіковим часом руху по ній. В роботі проведено дослідження можливості забезпечення раціонального рекуперативного режиму в залежності від маси складу поїзда, величину ухилу, початкової швидкості гальмування. Результати представлені у відповідних таблицях (табл. 1, 2) та графіках (рис. 6, 7).

Таблиця 1

Результати розрахунків $B(V)$ при гальмуванні тільки за рахунок рекуперації на ухилі $i_c = 4\%$ поїзда з різними значеннями маси складу

Швидкість V , км/год	Гальмівна сила B , кН					
	$Q=1000$ т	$Q=1500$ т	$Q=2000$ т	$Q=2500$ т	$Q=3000$ т	$Q=3500$ т
100	96,6	139,3	181,96	224,6	267,3	309,9
95	98,5	141,8	185,1	228,4	271,8	315,1
90	100,2	144,2	188,1	232,1	276	319,9
85	101,9	146,4	190,99	235,5	280,1	324,7
80	103,5	148,6	193,7	238,8	284	329,1
75	104,9	150,7	196,3	242	287,7	333,4
70	106,4	152,6	198,8	245	291,2	337,4

Таблиця 2

Результати розрахунків $B(V)$ при гальмуванні тільки за рахунок рекуперації з масою складу $Q = 2500$ т на ухилах з різними значеннями i_c

Швидкість V , км/год	Гальмівна сила B , кН					
	$i_c = 3\%$	$i_c = 4\%$	$i_c = 5\%$	$i_c = 6\%$	$i_c = 7\%$	$i_c = 8\%$
100	198,3	224,6	250,9	277,3	303,6	329,9
95	202,1	228,4	254,8	281,1	307,4	333,8
90	205,7	232,1	258,4	284,7	311,1	337,4
85	209,2	235,5	261,9	288,2	314,5	340,9
80	212,5	238,8	265,2	291,5	317,9	344,2
75	215,7	242	268,4	294,7	321	347,3
70	218,7	245	271,3	297,7	324	350,3

Рисунок 6 – Гальмівні характеристики $B(V)$ для шести значень Q при рекуперативному гальмуванні на ухилі з $i_c = 4\%$

Рисунок 7 – Гальмівні характеристики $B(V)$ для різних значень i_c при рекуперативному гальмуванні поїзда із масою складу $Q = 2500$ т

Таким чином, раціональний режим рекуперативного гальмування об'єктивно можливо застосувати для поїздів з масою складу $Q \leq 3000$ т на ухилах із значенням $i_c \leq 6\%$. Тобто проведені дослідження підтверджують можливість і доцільність застосування раціонального рекуперативного гальмування легкових поїздів (до 3000 т) на ділянках з рівнинно-горбистим профілем ($i_c \leq 6\%$), який характерний для більшості залізниць України.

У третьому розділі запропоновано структуру та математичну модель системи автоматичного керування рекуперативним гальмуванням.

Запропонована схема системи автоматичного керування рекуперативним гальмуванням САК РГ (рис. 8) дозволяє забезпечити плавність процесу гальмування, відносну простоту керування цим процесом, а також при використанні су-

часних швидкодіючих мікроконтролерів реалізує рекуперативне гальмування із зменшенням швидкості руху в раціональному режимі. САК РГ складається з основного кола регулювання та чотирьох віток зворотних зв'язків: по струму збудження, по співвідношенню струмів збудження і рекуперації, по максимальній напрузі на колекторах тягових двигунів, а також по швидкості руху поїзда.

Основне коло регулювання складається з: блоку початкових умов (БПУ), розрахункового пристрою (РП), блоку завдання струму якоря (ЗСЯ), регулятора струму якоря (РСЯ). Головне коло схеми рис. 8 призначене для регулювання струму рекуперації при нормальному режимі рекуперативного гальмування, тобто при струмі збудження меншим максимального допустимого значення, при заданому співвідношенні струмів рекуперації та збудження і при допустимому в експлуатації рівні напруги в контактній мережі. Для функціонування схеми в блок початкових умов необхідно ввести значення маси поїзда, час руху по ділянці за графіком, довжину ділянки гальмування, кінцеву швидкість гальмування, середнє значення величини спрямленого ухилу, а також інформацію, що надходить від давачів – значення поточної швидкості руху поїзда і напруги в контактній мережі. Розрахунковий пристрій представляє собою програмно-апаратний комплекс, в якому у відповідності з заданою програмою по формуванню гальмівної характеристики розраховується значення гальмівної сили для поточної швидкості. Також у розрахунковому пристрої відбувається контроль за відпрацюванням заданого режиму рекуперативного гальмування: порівнюється дійсне значення швидкості руху поїзда з розрахованим для контрольного моменту часу та шляху гальмування. Якщо дійсне значення швидкості руху поїзда V (з давача) відрізняється від розрахованого в контрольній точці шляху, то відбувається корегування гальмівної характеристики. Від РП сигнал пропорційний значенню розрахованої гальмівної сили

подається на вхід блока завдання струму якоря.

Вітка гнучкого зворотного зв'язку між давачем струму збудження (ДСЗ) і вузлом порівняння 2 призначена для стабілізації струму збудження при юзі колісних пар.

Вітка зворотного зв'язку по співвідношенню струмів збудження і рекуперації (ЕСС) призначена для обмеження струму рекуперації по потенціальним умовам на колекторах тягових електродвигунів і вступає в дію коли величина $\frac{I_{\text{я}}}{I_3}$ перевищує допустиме значення.

Вітка зворотного зв'язку між давачами напруги ДН1 і ДН2 (сигнали від яких подаються на вхід блока МАКС ДН) і вузлом порівняння 3 призначена для обмеження напруги на тягових електродвигунах. Логічний елемент МАКС виконує роль проміжного елемента, на виході якого з'являється тільки найбільший сигнал із діючих у нього на вході.

Для забезпечення плавного зростання ЕРС двигунів (відповідно і плавного зростання струму якоря), з метою виключення кидків струму під час входження електровоза в режим рекуперації, в схемі САК РГ (рис. 8) передбачено блок регулювання рівня напруги (РН).

Для дослідження динамічних процесів, що виникають в системі під дією зовнішніх збурень розроблена її математична модель, тобто записана система диференціальних рівнянь, що описують роботу тягових електродвигунів та системи керування в режимі рекуперативного гальмування.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{макс}} = \begin{cases} U_{\text{рмн}}, \text{ якщо } U_{\text{дн}} \geq U_{\text{зад}} \\ U_{\text{рмз}}, \text{ якщо } i_3(t) \geq I_{\text{ззад}} \\ U_{\text{есс}}, \text{ якщо } \frac{i_{\text{я}}(t)}{i_3(t)} \geq K_{\text{т}} \\ U_{\text{рся}}, \text{ інакше} \end{cases} \\ \lambda = U_{\text{макс}} \cdot K_{\text{БКЗ}} \\ L_3 \cdot \frac{du_3(t)}{dt} = \frac{(1-\lambda) \cdot u_{\text{мер}}(t)}{N \cdot K_{\text{тр}}} - u_3(t) \cdot R_3 \\ L_{\text{оз}} \cdot \frac{di_3(t)}{dt} = u_3(t) - i_3(t) \cdot R_{\text{оз}} \\ L_{\text{я}} \cdot \frac{di_{\text{я}}(t)}{dt} = c\Phi(i(t)) \cdot \omega_{\text{дв}}(t) - u_{\text{мер}}(t) - i_{\text{я}}(t) \cdot R_{\text{я}} \\ J \cdot \frac{d\omega_{\text{дв}}(t)}{dt} = \frac{M_{\text{п}} \cdot g \cdot \eta_{\text{ф}} \cdot (i_{\text{с}} - \omega_{\text{о}})}{c_{\text{о}} \cdot 10^3} - c\Phi(i(t)) \cdot i_{\text{я}}(t), \end{array} \right. \quad (7)$$

де $U_{\text{рмн}}$ - сигнал на виході блоку регулювання по рівневі напруги в мережі (РМН на рис. 8);

- $U_{\text{рмз}}$ - сигнал на виході блоку регулювання струму збудження (РМЗ);
 U_{ecc} - сигнал на виході блоку ЕСС;
 $U_{\text{рся}}$ - сигнал на виході блоку РСЯ в головному колі керування;
 $K_{\text{БКЗ}}$ - постійний коефіцієнт передачі блока керування збудником;
 $i_{\text{я}}(t)$ - значення струму в обмотці якоря тягового двигуна, А;
 $i_{\text{з}}(t)$ - значення струму в обмотці збудження тягового двигуна, А;
 $u_{\text{з}}(t)$ - вихідна напруга збудника, В;
 $L_{\text{з}}$ - індуктивність внутрішніх кіл збудника, Гн;
 λ - коефіцієнт заповнення імпульсів в періоді ШІМ;
 $u_{\text{мер}}(t)$ - значення напруги в контактній мережі, В;
 N - кількість силових комірок перетворювача, шт;
 $K_{\text{тр}}$ - коефіцієнт трансформації трансформатора;
 $R_{\text{з}}$ - внутрішній опір збудника, Ом.
 $L_{\text{я}}, L_{\text{оз}}$ - відповідно середні значення індуктивностей якірного кола і обмотки збудження тягового двигуна, Гн;
 $R_{\text{я}}, R_{\text{оз}}$ - відповідно активні опори якірного кола і обмотки збудження тягового двигуна, Ом;
 $\omega_{\text{дв}}$ - кутова швидкість обертання вала тягового двигуна, с⁻¹;
 J - момент інерції поїзда приведений до валу тягового двигуна, кг·м²;
 $M_{\text{п}}$ - маса поїзда, кг;
 η_{F} - коефіцієнт, що враховує втрати сили в електродвигунах та передачі;
 Φ - магнітний потік головних полюсів, Вб;
 c - конструктивна стала електродвигуна;
 c_0 - кількість осей електровоза.

У четвертому розділі досліджено динамічні процеси в електричних колах електрорухомого складу та визначена стійкість САК РГ.

В дисертаційній роботі досліджені перехідні процеси в розробленій САК РГ, що викликаються збуреннями, які властиві нормальним експлуатаційним режимам. Оскільки система рівнянь (7) містить нелінійні елементи, то для дослідження перехідних процесів в САК РГ використані чисельні: метод Рунге-Кутта зі змінним кроком інтегрування для розв'язання системи рівнянь, а для порівняння і підтвердження достовірності результатів розрахунків за допомогою методу Рунге-Кутта проведені аналогічні розрахунки за допомогою методу Булірша-Штера, який в останній час використовується для розв'язання аналогічних задач. Обидва числові методи інтегрування диференціальних рівнянь є дискретними методами, дозволяють визначити значення шуканих функцій на множині точок $\{t_n, n \in N\}$, де t_n - незалежна змінна, яка належить множині N .

Зовнішнє збурення для САК РГ в експлуатації, що найбільш динамічно змінюється, є напруга в контактній мережі, причому перехідні процеси, викликані

стрибкоподібною зміною напруги в мережі носять найбільш тяжкий характер. Тому проведені дослідження перехідних процесів в силовому колі і в колі керування при стрибкоподібній зміні напруги в контактній мережі, а також при короточасній втраті контакту між струмоприймачем і контактним дротом. Перехідні процеси досліджені також при включені-виключені рекуперації з резистором гасіння в колі обмоток збудження і без нього.

Автором розроблені відповідні програми для отримання графіків залежностей $i_{\text{я}}(t)$ та $i_3(t)$.

Аналіз результатів розрахунку залежностей $i_{\text{я}}(t)$ і $i_3(t)$ при стрибкоподібному зменшенні напруги в контактній мережі на 100, 200, 300, 400, 500 В показує, що при зменшенні напруги в контактній мережі на 400 В включно, що часто відповідає експлуатаційним умовам, максимальний кидок струму не перевищує максимального допустимого значення, яке складає $2 \cdot I_{\text{ян}}$ (для тягового двигуна ЕД-141У1 $I_{\text{ян}} = 565 \text{ А}$).

Результати досліджень залежностей $i_{\text{я}}(t)$ і $i_3(t)$ при входженні в режим рекуперативного гальмування показують, що процес входження в режим рекуперативного гальмування проходить в середньому не більше двох секунд і при цьому не спостерігається скільки-небудь значних кидків струму рекуперації. Плавне входження в режим гальмування досягається за рахунок введення в систему автоматичного керування блока регулювання напруги (РРН) на виході якого формується сигнал в відповідності з виразом:

$$U_{\text{зад}}(t) = U_{\text{задmax}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{m}} \right), \quad (13)$$

де $U_{\text{задmax}}$ - максимальна величина сигналу на виході блоку РРН, що визначається максимальним допустимим рівнем напруги в контактній мережі в режимі рекуперативного гальмування;

m - коефіцієнт, що визначає час входження в рекуперацію.

На рис. 9 показано графіки зміни струму рекуперації від часу для декількох значень коефіцієнта m ($Q = 3268 \text{ т}$, $i_c = 4\%$, $U_{\text{мер}} = 3,3 \text{ кВ}$). Зменшуючи m на 0,1 можливо зменшити час входження в рекуперацію в середньому на 0,3 с але при цьому виникають кидки струму. Так при значенні $m = 0,3$ пульсації струму рекуперації практично не спостерігається і він досягає свого усталеного значення приблизно за 2 с. У випадках коли $m = 0,2$ і $m = 0,1$ криві $i_{\text{я}}(t)$ досягають свого усталеного значення відповідно за 1,7 і 1,4 с але при цьому пульсації струму рекуперації складають до 25% і 50% відповідно.

Результати розрахунків залежностей $i_{\text{я}}(t)$ і $i_3(t)$ при виході з режиму рекуперативного гальмування проведено для трьох значень напруги в контактній мережі 2,2; 3,3; 3,8 кВ. Їх аналіз показує, що після відключення живлення обмоток збудження тягових двигунів струм в них спадає до нуля в середньому за 2 с. Оскільки по умовам безпеки руху необхідно мати можливість негайного переходу від режиму гальмування до режиму тяги, то в схемі напівпровідникового збудника передбачено резистор гасіння для форсування процесу відключення.

Для базового електровоза значення опору резистора гасіння дорівнює 1,1 Ом, що забезпечує час гасіння поля не більше 35 мс.

Найбільш важким в експлуатації перехідним режимом являється короткочасний відрив струмоприймача від контактної мережі (рис. 10).

Із рис. 10 видно, що при відновленні контакту з мережею відбувається кидок струму рекуперації і вже через 0,2 с величина струму встановилась на рівні, який був до зникнення контакту. Величина кидка струму рекуперації навіть не досягла номінального значення струму якоря тягового двигуна і тому не впливає на роботу системи.

Взагалі по отриманим графікам перехідних процесів можна зробити висновки, що динамічні властивості системи розробленої автором є задовільними.

Одна з основних умов нормального функціонування системи автоматичного регулювання полягає у вимозі стійкості її перехідного процесу. Оскільки система диференціальних рівнянь (7), що описує роботу САК РГ являється нелінійною, то для її лінеаризації використано метод інтегрованої апроксимації, що дає змогу застосувати метод визначення стійкості Рауса-Гурвиця.

Провівши лінеаризацію системи диференціальних рівнянь (7) автором отримано дванадцять систем лінійних диференціальних рівнянь, що описують роботу САК РГ. Дослідивши стійкість кожного стану системи за допомогою методу визначення стійкості Рауса-Гурвиця доведено, що запропонована САК РГ є стійкою.

П'ятий розділ присвячений питанням практичної реалізації роботи й її техніко-економічної ефективності.

За рахунок планомірного застосування раціонального рекуперативного гальмування тільки на Придніпровській залізниці можна отримати економію близько 0,71 млн кВт·год, що складає 116,44 тис. грн за рік.

При раціональному використанню рекуперативного гальмування на всіх залізницях України, а також з урахуванням економії гальмівних колодок, бандажів колісних пар і інших факторів економічний ефект буде значно більшим.

Результати досліджень рекомендуються при експлуатації діючих типів електровозів постійного струму (ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1), а також можуть використовуватись при розробці і проектуванні нових видів електрорухомого складу з рекуперативним гальмуванням.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних і практичних досліджень розроблені рекомендації по підвищенню ефективності використання рекуперативного гальмування в сучасних умовах, що є важливою науково-технічною задачею, розв'язання якої сприяє підвищенню ефективності роботи електрорухомого складу залізниць в цілому. Основні наукові результати, висновки і практичні рекомендації дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. У сучасних умовах роботи залізниць України, коли середня вага поїзда складає близько 1500 т, а середня вага вантажного поїзда близько 3000 т об'єктивно виникає збільшення імовірності можливості зменшення

- швидкості перед місцями її обмеження виключно за рахунок рекуперативного гальмування.
2. У цих умовах актуальними є дослідження, з метою забезпечення режиму руху поїзда при якому гарантовано надійне рекуперативне гальмування із заданим зменшенням швидкості на ділянці перед місцем обмеження швидкості при умові точного дотримання графікового часу. Такий режим у роботі позначено терміном – „раціональний”.
 3. Встановлено співвідношення між параметрами, що характеризують режим руху, використання якого дозволяє сформувавши гальмівну характеристику, яка забезпечує раціональний режим рекуперації, тобто зменшення швидкості легковагових (до 3000 т) поїздів на відносно малих ухилах (до 6‰) на ділянках перед місцями обмеження швидкості від початкового значення V_{Π} точно до кінцевого V_K виключно за рахунок рекуперативного гальмування при точному дотриманні графікового часу руху поїзда [7].
 4. Показано, що діючі системи автоматичного керування рекуперативним гальмуванням не забезпечують раціональний режим рекуперації, з точки зору виконання графікового часу на заданій ділянці. Середня величина відхилення від графікового значення часу складає 7,2%.
 5. Раціональний режим рекуперативного гальмування гарантовано можливо реалізувати для поїздів з масою складу $Q \leq 3000$ т на ухилах із значенням $i_c \leq 6\text{‰}$.
 6. Для реалізації раціонального режиму рекуперації сповільнення повинно бути постійним на всій ділянці гальмування.
 7. Розроблена структура системи автоматичного керування рекуперативним гальмуванням, що забезпечує виконання раціонального режиму рекуперативного гальмування поїзда [2, 6].
 8. В розробленій структурній схемі системи автоматичного керування передбачено спеціальний блок, який дозволяє забезпечити та контролювати потрібний інтервал часу входження в режим рекуперативного гальмування з метою запобігання суттєвих кидків гальмівного струму [8].
 9. Рекомендується системи автоматичного керування будувати на сучасних однокристальних швидкодіючих мікроконтролерах. Це значно підвищить надійність цих систем, зменшить масо-габаритні показники електрообладнання, а властива цим мікроконтролерам можливість перепрограмування спрощує процес змін у системі керування [5].
 10. Розроблена математична модель для дослідження перехідних процесів, з допомогою якої встановлено, що при використанні розробленої системи керування стрибкоподібне зменшення напруги в контактній мережі на 300-400 В включно, що відповідає експлуатаційним умовам, призводить до стрибків струму в силових колах, значення яких не перевищує подвійного струму до зміни напруги; час входження електровозу в режим рекуперативного гальмування повинен бути не

- менше 2...2,5 с; при відключенні режиму рекуперативного гальмування, струм в обмотках збудження спадає до нуля за 35 мс при встановленій системі гасіння поля.
11. Запропонована методика і з допомогою розробленої математичної моделі проведена оцінка стійкості розробленої системи автоматичного керування. Дослідження показали, що система керування має дванадцять станів кожен з яких відповідає умовам стійкості згідно критерію Рауса-Гурвиця, тому система в цілому є стійкою.
 12. В сучасних умовах роботи залізниць України впровадження раціонального режиму рекуперативного гальмування з точки зору економії енергії дуже актуально. Так тільки по Придніпровській залізниці можна отримати економію близько 0,71 млн кВт·год, що складає 116,44 тис. грн за рік.

Основні положення та результати дисертації опубліковані у таких працях:

1. Дубинец Л.В., Маренич О.Л., Момот А.И., Муха А.М., Корепанова Л.В., Устименко Д.В. Повышение эффективности рекуперации на спусках. // Гірнична електромеханіка та автоматика. Наук.-техн. зб. НГУ. Дніпропетровськ, Вип. 70, 2003. – С.124–129.
2. Дубинец Л.В., Устименко Д.В. Система автоматического регулирования тормозной силы, обеспечивающая рациональные значения энергии рекуперации электровозов постоянного тока. // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. Кременчук, Вип. 2(25), 2004. – С.12–15.
3. Устименко Д.В. Влияние формы характеристики рекуперативного торможения на величину отдаваемой в сеть энергии. // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. Кременчук, Вип. 2(19), 2003. – С.128–130.
4. Устименко Д.В. Рациональные режимы рекуперации электровозов. // Гірнична електромеханіка та автоматика. Наук.-техн. зб. НГУ. Дніпропетровськ, Вип. 71, 2004. – С.113–121.
5. Устименко Д.В. Применение микроконтроллеров в схемах электроподвижного состава. // Вісник НТУ “ХП”. Наук.-техн. зб. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. Харків, №11, 2003. – С.126–128.
6. Устименко Д.В. Система автоматического регулирования тормозной силы при рекуперации электровозов постоянного тока, выполненная на современной элементной базе. // Транспорт. Дніпропетровськ, Вип. 4, 2004. – С.51–55.
7. Устименко Д.В. Раціональна траєкторія руху поїзда при рекуперативному гальмуванні. // Гірнична електромеханіка та автоматика. Наук.-техн. зб. НГУ. Дніпропетровськ, Вип. 74, 2005. – С.98–102.
8. Устименко Д.В. Декларацийний патент на винахід. Пристрій автоматичного керування рекуперативним гальмуванням електрорухомого складу постійного струму. Патент України №70566А. МПК 7

В60L7/10, В60L7/22, В60L15/20. Заяв. 09.12.2003р. Опубл. 15.10.2004р. Бюл. №10.

Особистий внесок автора у роботах, опублікованих у співавторстві

Всі публікації, крім [1, 2], без співавторів.

У публікації [1] здобувачу належить чисельна оцінка ефективності безступінчастого способу регулювання гальмівного зусилля на електровозі ВЛ8, а в [2] – розробка функціональної схеми САК РГ для електровозів постійного струму і вивід аналітичного виразу гальмівної характеристики в відповідності з вибраною формою, а також дослідження перехідних режимів.

АНОТАЦІЯ

Устименко Д.В. Підвищення ефективності тяги поїздів шляхом удосконалення системи рекуперативного гальмування. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2006.

Дисертація присвячена дослідженням по зменшенню витрат енергії на тягу поїздів в сучасних умовах роботи залізниць України шляхом удосконалення системи рекуперативного гальмування електровозів постійного струму з використанням сучасної мікропроцесорної техніки.

Проаналізовано сучасний стан та умови роботи залізниць України, визначені умови та шлях по зменшенню витрат енергії на тягу поїздів.

Проведено дослідження, з метою забезпечення режиму руху поїзда, при якому гарантовано надійне рекуперативне гальмування на ділянці перед місцем обмеження швидкості при умові дотримання точно графікового часу. Такий режим у роботі позначено терміном – „раціональний”. Встановлено співвідношення між параметрами, що характеризують режими руху, використання якого дозволяє сформулювати гальмівну характеристику, яка забезпечує раціональний режим рекуперації, тобто зменшення швидкості легковагових (до 3000 т) поїздів на відносно малих ухилах (до 6‰) на ділянках перед місцями обмеження швидкості від початкового значення $V_{\text{п}}$ точно до кінцевого $V_{\text{к}}$ виключно за рахунок рекуперативного гальмування при точному дотриманні графікового часу руху поїзда. Показано, що діючі системи автоматичного керування рекуперативним гальмуванням не забезпечують раціональний режим рекуперації, з точки зору виконання графікового часу на заданій ділянці. Середня величина відхилення від графікового значення часу складає 7,2%.

Розроблено загальну структуру системи автоматичного керування рекуперативним гальмуванням (САК РГ), з використанням широких можливостей сучасної елементної бази, для реалізації гальмівного процесу по запропонованим характеристикам. Створена математична модель для дослідження динамічних процесів в розробленій системі.

Проведено аналіз перехідних процесів в розробленій САК РГ, що виклика-

ються збуреннями, які властиві нормальним експлуатаційним режимам. Дана оцінка стійкості розробленої системи.

Наведені рекомендації по практичному застосуванню результатів роботи та показана техніко-економічна ефективність їх використання.

Ключові слова: об'єм енергії рекуперації, гальмівна сила, структурна схема, математична модель, стійкість системи, перехідний процес.

АННОТАЦІЯ

Устименко Д.В. Повышение эффективности тяги поездов путем усовершенствования системы рекуперативного торможения. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – подвижной состав железных дорог и тяга поездов. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2006.

Диссертация посвящена исследованиям по решению задачи уменьшения расхода энергии на тягу поездов в современных условиях работы железнодорожного транспорта Украины путем усовершенствования системы рекуперативного торможения электровозов постоянного тока с использованием современной микропроцессорной техники.

Проанализировано современное состояние и условия работы железных дорог Украины, определенные условия и путь по уменьшению затрат энергии на тягу поездов.

Проведены исследования, с целью обеспечения режима движения поезда, при котором гарантировано надежное рекуперативное торможение на участке перед местом ограничения скорости при условии точного соблюдения графика движения. Такой режим в работе обозначено термином – „рациональный”. Установлено соотношение между параметрами, которые характеризуют режимы движения, использование которого позволяет сформировать тормозную характеристику, которая обеспечивает рациональный режим рекуперации, т.е. уменьшение скорости легковесных (до 3000 т) поездов на относительно малых уклонах (до 6‰) на участках перед местами ограничения скорости от начального значения точно до конечного исключительно за счет рекуперативного торможения при точном соблюдении графика движения. Показано, что действующие системы автоматического управления рекуперативным торможением не обеспечивают рациональный режим рекуперации, с точки зрения выполнения графика. Средняя величина отклонения от графикового значения времени составляет 7,2%.

Разработана общая структура системы автоматического управления рекуперативным торможением (САУ РТ), с использованием широких возможностей современной элементной базы, для реализации тормозного процесса по предложенным характеристикам. Силовая часть схемы состоит из индивидуальных полупроводниковых возбуждателей, которые питают каждую пару обмоток возбуждения соединенных между собой последовательно. Возбудитель представляет собой широтно-импульсный преобразователь постоянного напряжения сети в постоянное регулируемое напряжение питания обмоток возбуждения с проме-

жуточным звеном переменного тока.

Разработана математическая модель САУ РТ для исследования динамических процессов протекающих в ней.

Проведен анализ переходных процессов в разработанной САУ РТ, которые вызываются возмущениями свойственные нормальным эксплуатационным режимам. Для расчета переходных режимов использовано два независимых метода численного интегрирования дифференциальных уравнений: метод Рунге-Кутты с переменным шагом интегрирования и метод Булирша-Штера с переменным шагом интегрирования. Сравнение результатов полученных с использованием этих методов позволяет сделать вывод достоверности и правильности проведенных расчетов.

Дана оценка устойчивости разработанной системы на основе критерия Рауса-Гурвица.

Проведена экспериментальная проверка работоспособности отдельных блоков САУ РТ в лабораторных условиях. Сходимость теоретических и практических результатов высокая. Даны рекомендации по практическому применению результатов исследований и показана технико-экономическая эффективность их использования.

Ключевые слова: объем энергии рекуперации, тормозная сила, структурная схема, математическая модель, устойчивость системы, переходный процесс.

ABSTRACT

Ustimenko D.V. Increase of efficiency of draft of trains by improvement of system of recuperative braking. - the Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.22.07 – rolling stock of railways and draft of trains. The Dnipropetrovsk national university of a railway transportation of a name of academician V.Lazarjana, Dnipropetrovsk, 2006.

The dissertation is devoted to researches under the decision of a problem of reduction of a power consumption on draft of trains in modern operating conditions of a railway transportation of Ukraine by improvement of system of recuperative braking electric locomotives of a direct current with use of modern microprocessor technique.

Researches are lead, with the purpose of maintenance of a mode of movement of a train at which reliable recuperative braking on a site before a place of restriction of speed under condition of exact observance of the train diagram is guaranteed. Such mode in work it is designated by the term - "rational". The parity between parameters is established, which characterize modes of movement, which use allows to generate the brake characteristic which provides a rational mode рекуперации, i.e. reduction of speed superficial (up to 3000 т) trains on rather small biases (up to 6 %) on sites before places of restriction of speed from initial value is exact up to final extremely due to recuperative braking at exact observance of the train diagram. It is shown, that working systems of automatic control do not provide with recuperative breaking a rational mode recuperative, from the point of view of performance of the schedule. The average size of a deviation from schedule value of time makes 7,2 %.

The general structure of system of automatic control by recuperative braking (SAC RB), with use of ample opportunities of modern element base, for realization of brake process under the offered characteristics is developed. The power part of the circuit will consist of individual semi-conductor activators which have each pair of windings of excitation connected among themselves consistently. The activator represents the pulse-width converter of a constant pressure of a network in a constant adjustable pressure of a feed of windings of excitation with an intermediate link of an alternating current.

Mathematical model SAC RB for research of dynamic processes proceeding in it is developed.

The analysis of transients in developed SAC RB which are caused by indignations peculiar to normal operational modes is lead. For calculation of transitive modes it is used two independent methods of numerical integration of the differential equations. The estimation of stability of the developed system is given on the basis of Raus-Gurvits's criterion.

Experimental check of serviceability of separate blocks SAC RB in laboratory conditions is lead. Convergence of theoretical and practical results high. Recommendations on practical application of results of researches are given and technical and economic efficiency of their use is shown.

Key words: volume of energy рекуперации, brake force, the block diagram, mathematical model, stability of system, transient.

УСТИМЕНКО ДМИТРО ВОЛОДИМИРОВИЧ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГИ ПОЇЗДІВ ШЛЯХОМ
УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ РЕКУПЕРАТИВНОГО
ГАЛЬМУВАННЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск

д.т.н., професор Дубинець Л.В.

Підписано до друку “___” _____ 2006 р.
Формат паперу 60×48 1/16. Папір для розмножувальних апаратів.
Друк офсетний. Умовн.-друк. 0,9. Обл.-вид. арк.. 1,0.
Замовлення № _____. Тираж 100. Безкоштовно.

Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна

Свідоцтво ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса видавництва та дільниці оперативної поліграфії:
49010, вул.. Акад. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 10