

Міністерство освіти і науки України
Дніпропетровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна

Кислий Дмитро Миколайович

УДК 629.424:629.46.016.2/.5(043.3)

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВЕДЕННЯ
ВАНТАЖНИХ ПОЇЗДІВ ТЕПЛОВОЗАМИ**

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Локомотиви» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Боднар Борис Євгенович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, перший проректор, професор кафедри «Локомотиви»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ткаченко Віктор Петрович,
Державний економіко-технологічний університет транспорту, завідувач кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць»

кандидат технічних наук, доцент
Клюєв Сергій Олександрович,
Східноукраїнський національний університет імені В. Даля, доцент кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті»

Захист відбудеться «26» травня 2017 об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д08.820.02 Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, Дніпро, вул. Лазаряна, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, Дніпро, вул. Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий «25» квітня 2017

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради Д08.820.02

І. В. Жуковицький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогодні Укрзалізниця є одним з найбільших споживачів енергоресурсів в Україні. Відповідно до «Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року», схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. №1555-р, одним з основних напрямків діяльності залізниць є забезпечення їх тяговим рухомим складом (ТРС) вітчизняного виробництва, здатним істотно підвищити техніко-технологічні показники роботи ТРС, а саме: знизити питомі витрати енергоресурсів; підвищити ефективність використання локомотивів та ін.

Для підвищення рівня безпеки, показників якості та ефективності перевезень пасажирів та вантажів, енергоефективності, техногенного навантаження на навколишнє природне середовище сучасним умовам, Кабінетом Міністрів України розпорядженням від 20 жовтня 2010 р. №2174-р схвалено «Транспортну стратегію України на період до 2020 року».

В умовах сучасного стану парку тягового рухомого складу Укрзалізниці та постійного зростання вартості паливо-енергетичних ресурсів постає необхідність аналізу та наукового обґрунтування режимів керування локомотивом, їх раціоналізації, розрахунку індивідуальних енергозаощаджуючих режимних карт, коригування графіків руху поїздів.

Дослідження вітчизняних та закордонних вчених показали, що завдяки застосуванню енергозаощаджуючих режимів ведення поїзда ділянкою, зокрема за рахунок вмілого використання його кінетичної енергії, можна досягти зниження споживання енергоресурсів на тягу поїздів до 20 %. Оскільки режим ведення залежить від безлічі факторів, які впливають на поїзд, необхідно виконувати його індивідуальний розрахунок після формування поїзда.

Наукові дослідження останніх років, виконані українськими та закордонними вченими та фахівцями, показують, що завдання зниження витрати паливо-енергетичних ресурсів на тягу ще не вирішене остаточно через свою складність та багатогранність і обумовлює актуальність роботи, спрямованої на підвищення енергоефективності ведення вантажних поїздів тепловозами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, зокрема в рамках держбюджетної теми «Виконання аналізу можливих причин відхилення витрат дизельного палива від існуючих норм та підготовка рекомендацій зі зменшення витрат палива», договір № ОД/Т-15-787НЮ (№79.21.15.15) від 18.09.2015 р. (№ ДР 0115U007071), госпдоговірна тема «Виготовлення тривимірної панорами ділянки Кривий Ріг – Тимкове», договір № 79.20.15.15 від 03.08.2015 р. (№ ДР 0115U001863).

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є зниження експлуатаційних витрат на переміщення поїзда ділянкою за рахунок вибору економічно обґрунтованих індивідуальних режимів ведення.

Для досягнення мети необхідно розв'язати наступні задачі:

– виконати аналіз існуючих методів визначення енергозаощаджуючих режимів

ведення поїздів;

- скласти математичну модель руху поїзда, адаптовану для оперативного розв'язання тягово-оптимізаційних задач;
- перевірити адекватність та точність математичної моделі;
- розробити методику визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів на всіх фазах руху;
- розробити алгоритмічне та програмне забезпечення для розрахунків енергоефективних режимів керування поїздом;
- розробити апаратне забезпечення обробки тягових параметрів локомотива;
- обґрунтувати економічну ефективність впровадження раціональних режимів ведення.

Об'єкт дослідження. Процес руху поїзда по ділянці.

Предмет дослідження. Режим ведення поїзда.

Методи дослідження. Для вирішення сформульованих задач використано сучасні методи математичного моделювання. При моделюванні роботи дизеля застосовано методи інтерполяції та апроксимації. Електрична частина передачі тепловоза змодельована в пакеті «Maple» із застосуванням методу імітаційного моделювання (логічного макромодельовання).

Моделювання руху поїзда виконано за допомогою методів системного аналізу, числових методів розв'язання диференціальних рівнянь. Точність та адекватність моделі перевірялася за допомогою методів імітаційного моделювання та числового розв'язання диференціальних рівнянь: класичного, Рунге–Кутти–Фельберга, Розенброка та перевірялась з експериментальними даними. Визначення енергозощаджуючих режимів керування для окремих фаз руху поїзда виконано методами рівномірного пошуку, ітерацій (метод послідовних наближень), нелінійного програмування та локальних варіацій.

Наукова новизна отриманих результатів. В дисертації отримані нові науково обґрунтовані результати, які розв'язують наукове завдання підвищення енергоефективності ведення вантажних поїздів тепловозами, що має істотне значення для залізничного транспорту. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- вперше визначено функції двох змінних раціонального режиму керування тяговим рухомим складом для окремих фаз руху, які дозволяють одержати енергозощаджуючу траєкторію руху поїзда за одну ітерацію за рахунок попередньо визначених раціональних співвідношень маса складу – ухил – позиція керування та маса складу – ухил – швидкість руху;

- удосконалено метод виконання тягових розрахунків за рахунок обчислення варіативних траєкторій руху, який дозволяє отримати розв'язання рівняння руху поїзда у вигляді залежності час ходу поїзда – витрата енергоресурсів;

- набув подальшого розвитку метод визначення розподілу часу ходу поїзда по перегонам на підставі раціональних рівномірних швидкостей, що дозволило обчислювати енергозощаджуючу траєкторію руху поїзда з урахуванням графікового часу;

- набув подальшого розвитку метод рішення рівняння руху поїзда з визначенням енергозощаджуючих режимів за рахунок використання методу локальних варіацій, який дозволив одержати мінімальну витрату енергоресурсів за умови обмеження

часу ходу поїзда;

- набув подальшого розвитку метод усереднення ухилів за рахунок врахування розподілу маси по довжині поїзда та раціонального інтервалу рішення рівняння потенційної енергії поїзда, що дозволило більш точно враховувати прискорювально-сповільнювальні сили;

- визначено раціональні межі застосування та значення кроку змінних інтегрування рівняння руху поїзда, що дозволило зменшити кількість обчислень без втрати точності розрахунків.

Практична цінність отриманих результатів. На підставі одержаних методів, методик алгоритмів, програмного та апаратного забезпечення створено:

- методику визначення енергозощаджуючого режиму керування локомотивом. Методика дозволяє розраховувати раціональне керування в окремих фазах руху, а саме під час рушання та розгону, підтримування кінетичної енергії та вибігу залежно від серії тепловоза, маси складу та профілю колії;

- програмний комплекс для розрахунку індивідуальних режимних карт енергозощаджуючого ведення поїздів для певної ділянки та маси складу, який дозволяє зощаджувати до 12 % паливних ресурсів;

- апаратний комплекс реєстрації тягових параметрів локомотива для можливості застосування програмного комплексу в бортовій системі локомотива.

Особистий внесок. Усі наукові положення дисертаційної роботи, що виносяться на захист, сформульовані автором особисто. Авторіві належить: постановка та обґрунтування мети роботи, планування та проведення досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів, підготовка наукових статей до друку, участь у промисловому випробуванні результатів роботи. Постановка задач та обговорення результатів досліджень виконані спільно з науковим керівником та співавторами публікацій. У публікаціях, які відображають основні результати дисертації й написані в співавторстві, здобувачеві належать: у [1] – розроблено методику та реалізовано алгоритм визначення раціональної тривалості вибігу, сформовано висновки; у [2] – складено алгоритм та модель визначення енергозощаджуючих режимів розгону поїздів; у [3] – розроблено спосіб визначення сили тяги локомотива; у [4] – запропоновано методику визначення раціонального режиму керування локомотивом та визначено універсальні функціональні та числові залежності; у [5] – розроблено пропозиції щодо поліпшення техніко-енергетичних параметрів тепловозів. На програмний комплекс розрахунку індивідуальних режимів ведення поїздів отримано авторське свідоцтво [6].

Робота [4] виконана автором самостійно.

Апробація результатів роботи. Матеріали роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях та семінарах: 70, 71, 72, 73, 74 і 75-й міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015); V та VI Міжнародних науково-практичних конференціях «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» (Воловець, 2014, 2015), Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених, магістрантів та студентів «Науково-технічний прогрес на транспорті» (Дніпропетровськ, 2012), 74

Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми розвитку інтелектуальних систем транспорту» (Дніпропетровськ, 2014).

Публікації. Положення дисертаційної роботи викладені в 24 наукових працях, серед яких 6 наукових статей, з них 5 відображають основні наукові результати – опубліковані у спеціалізованих фахових виданнях, затверджених департаментом атестації кадрів МОН України, в тому числі 4 в журналах, що входять до наукометричних баз даних, 4 патенти на корисну модель, 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, 13 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків та додатків, містить 156 сторінок, включаючи 126 сторінок основного тексту, 56 рисунків, 17 таблиць та список використаних джерел зі 145 найменувань на 16 сторінках, 10 додатків на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведена загальна характеристика та обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи; сформульована мета та задачі досліджень; охарактеризована наукова новизна та практичне значення отриманих результатів; надана інформація про апробацію роботи та її зв'язок з науково-дослідницькими темами; зазначена кількість публікацій за темою дисертації та вказаний особистий внесок здобувача в публікаціях, які підготовлені за участю співавторів.

У першому розділі на підставі огляду методів рішення рівняння руху поїзда та аналізу методів підвищення енергоефективності ведення поїздів встановлено, що задача визначення раціональних режимів керування тяговим рухом складом (ТРС) вирішена не в повному обсязі.

Аналіз робіт по темі виявив основні напрямки, в яких проводяться дослідження: оптимізація режимів руху поїздів, в т.ч. з врахуванням динамічних складових; розробка енергозощаджуючих графіків руху поїздів; автоматизація та організація керуючої діяльності машиніста.

Значний внесок у вирішення проблеми визначення раціонального ведення поїздів внесли вчені та інженери, які проводили фундаментальні дослідження тяги поїздів: П. М. Астахов, А. М. Бабічков, І. І. Васильєв, Б. Д. Воскресенський, П. Т. Гребенюк, П. А. Гурський, В. В. Деєв, Є. Ф. Єгорченко, І. П. Ісаєв, Б. М. Максимович, О. П. Новіков, М. М. Сидоров, Д. А. Штанге та ін.

Дослідженням динаміки поїзда з визначенням раціональних режимів ведення присвячені роботи М. Є. Жуковського, В. А. Лазаряна, Є. П. Блохіна, Л. М. Коротенка, Л. А. Манашкіна, Г. І. Богомаза, С. В. Мямліна та ін.

Визначенню оптимальних режимів ведення на підставі сучасних математичних методів присвячені роботи Л. О. Баранова, Б. Є. Боднара, А. А. Босова, О. Я. Гаккеля, Г. К. Гетьмана, Г. П. Епштейна, Г. В. Євдомахі, Є. В. Єрофєєва, А. М. Костроміна, В. М. Лісіцина, Г. П. Маслова, О. А. Некрасова, В. О. Нехаєва, Ю. П. Петрова, О. Д. Попова, О. М. Пшінька, В. В. Скалозуба, В. П. Феоктистова та ін.

На підставі проведеного аналізу сформульовані мета та задачі дисертаційної роботи. Методом рішення рівняння руху поїзда обрано аналітичний, визначення енергоефективних режимів проведено за методом нелінійного програмування з використанням методу локальних варіацій.

У другому розділі розглянуто процес переміщення поїзда ділянкою. Для проведення досліджень складено імітаційну модель руху поїзда, в якій поїзд розглядається як ланцюг з розподіленою масою.

Для моделі, в якій поїзд розглядається у вигляді ланцюга з розподіленою масою, доцільно використовувати усереднення ухилів профілю колії по довжині поїзда з урахуванням розподілу маси складу та локомотива

$$i_{Q1}^c = \frac{1}{l_{\Pi} \cdot Q} \cdot \int_{x-l_{\Pi}/2}^{x+l_{\Pi}/2} i^d(s) \cdot Q_p(s, x) \cdot ds, \quad (1)$$

де l_{Π} – довжина поїзда;

Q – маса складу;

$Q_p(s)$ – розподіл маси по довжині поїзда;

x – поточна координата встановлення середини поїзда;

$i^d(s)$ – дійсний профіль колії;

s – шлях.

При аналізі диференціального рівняння руху поїзда

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = \xi \left(\frac{F_d(v, I_{\text{тед}}(u), \eta_{\Pi}) - B(v, u(x), l_{\Pi}) - W(v, x)}{P + Q} - \tilde{i}(x) \right), \quad (2)$$

де v – швидкість;

t – час;

ξ – прискорення поїзда під дією питомої сили 1 Н/кН;

F_d – дотична сила тяги;

$I_{\text{тед}}$ – струм тягового електродвигуна (ТЕД);

u – управління локомотивом при відповідному режимі роботи;

η_{Π} – коефіцієнт корисної дії (ККД) передачі;

B – гальмівна сила;

W – сила опору руху поїзда;

$\tilde{i}$ – сила, викликана профілем колії,

та прийнявши питому рівнодіючу силу

$$r = \frac{F_d(v, I_{\text{тед}}(u), \eta_{\Pi}) - B(v, u(x), l_{\Pi}) - W(v, x)}{P + Q} - \tilde{i}(x), \quad (3)$$

складено його розв'язок в формі задачі Коші з використанням принципу малих відхилень для рівнянь, що можуть бути лінеаризовані:

– при інтегруванні рівняння (2) по змінним швидкості v та шляху s отримуємо

$$v_j = \Re \sqrt{\frac{\Delta s \cdot \xi \cdot r}{500}} + v_{j-1}^2; \quad (4)$$

– при інтегруванні рівняння (2) по змінним швидкості v та часу t отримуємо

$$t_j = 60 \cdot \frac{\Delta v}{\xi \cdot r} + t_{j-1}, \quad (5)$$

де Δs – крок інтегрування по шляху;

Δv – крок інтегрування по швидкості;
 $\Re$ – функція виділення дійсного числа.

Математична модель при визначенні дотичної сили тяги локомотива F_d [3, 19, 20] враховує наступні залежності: потужність дизеля N_e [5, 7, 8], залежну від частоти обертання колінчастого валу $n_{кв}$ [9], яка задається контролером машиніста $N_{ПКМ}$, коефіцієнт корисної дії проміжних ланок передачі потужності $\eta = \prod \eta_i(I_{тед}(N_{ПКМ}, v))$, силу зчеплення коліс з рейками $F_d \leq F_{зч}$. Обчислення витрати енергоресурсів виконується, виходячи з залежності витрати палива від ефективної потужності дизеля $g = f(N_e)$. Вказані характеристики відповідають технічному стану локомотива після виконання ремонту обсягом ПР-3.

Для зменшення витрат часу на розрахунки математичної моделі без втрати точності обчислень запропоновано умовою вибору кроку змінних інтегрування обрати рівність відстаней між суміжними точками траєкторії руху поїзда в координатах $v-s$ (рис. 1). Перевірка моделі показала, що при кроці інтегрування для шляху $\Delta s = 50$ м та швидкості $\Delta v = 1$ км/год забезпечується висока швидкодія без погіршення точності та адекватності.

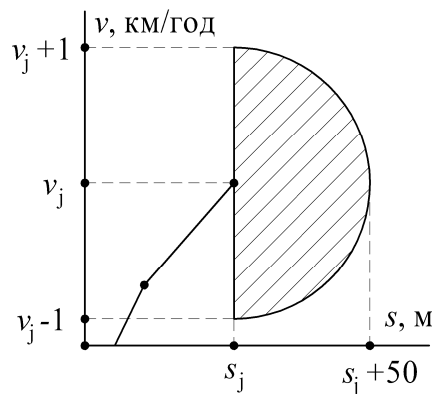


Рисунок 1 – Область допустимих значень кроку інтегрування рівняння руху поїзда

При інтегруванні рівняння руху поїзда за формулою (4) крок інтегрування Δs_j , м, розраховується за формулою

$$\Delta s_j = 50 \sqrt{1 - (v_{j-2} - v_{j-1})^2}; \quad (6)$$

при інтегруванні за формулою (5) крок інтегрування Δv_j , км/год, розраховується за формулою

$$\Delta v_j = \sqrt{1 - \left(\frac{s_{j-2} - s_{j-1}}{50} \right)^2}. \quad (7)$$

Найбільша точність моделі досягається при інтегруванні рівняння руху поїзда по певним змінним за наступних умов:

– під час рушання та розгону до швидкості 40 км/год – інтегруванням по змінним швидкості v та часу t ;

- під час руху в режимі тяги з регулюванням потужності та в режимі вибігу – інтегруванням по змінним шляху s та швидкості v ;
- в режимі гальмування – інтегруванням по швидкості v та часу t .

За допомогою пакету символьних обчислень «Maple» створено імітаційну модель руху поїзда, перевірено її точність та адекватність порівнянням розрахованих характеристик локомотива з наведеними в Правилах тягових розрахунків; розрахованих траєкторій руху поїзда за рівняннями (4), (5) з траєкторіями, отриманими при інтегруванні за класичним методом, методами Рунге–Кутти–Фельберга, Розенброка (табл. 1, рис. 2).

Таблиця 1

Результати перевірки точності та адекватності математичної моделі руху поїзда

Метод	s , м	v , км/ГОД	t , хв
Класичний	5500/1,45	90,12/-0,04	5,38/-0,74
Рунге–Кутти–Фельберга	5503/-0,83	88,09/0,02	5,41/-0,18
Розенброка	5506/1,45	90,12/0,07	5,38/-0,74
Запропонований	5502/0,69*	88,83/0,02*	5,49/-0,55*
Примітка: в чисельнику – абсолютне значення; в знаменнику – похибка; * – середнє значення похибки			

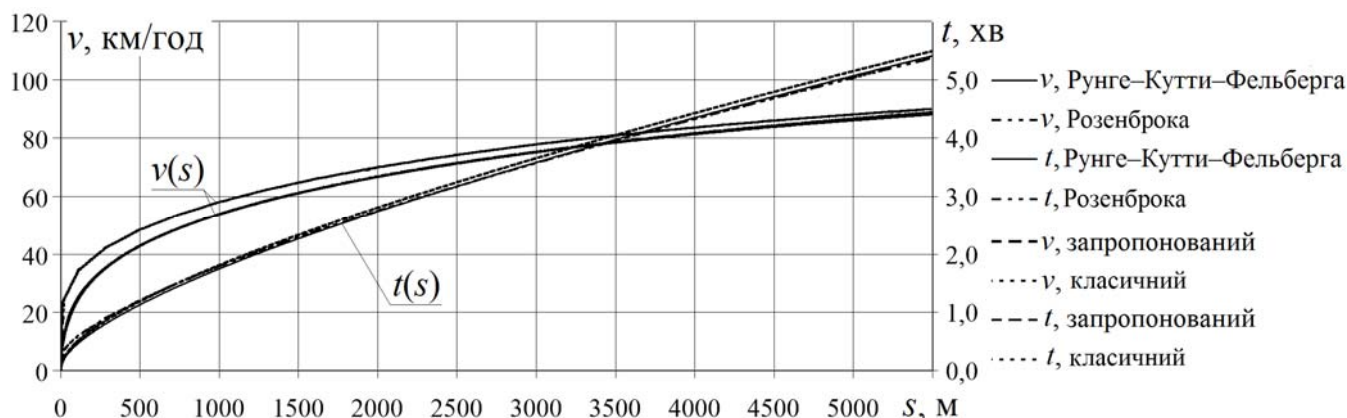


Рисунок 2 – Графічна інтерпретація перевірки точності та адекватності моделі

В третьому розділі проведено аналіз критеріїв оптимальності, на підставі якого обрано комплексний адитивний критерій локальної мінімізації. Сформовано умову раціональності режиму

$$\begin{bmatrix} g(u,s) \\ t(v(s)) \end{bmatrix} \rightarrow \min \quad (8)$$

та цільову функцію

$$k \left(\frac{g(u,s)}{t(v(s))} \right) \rightarrow \min, \quad (9)$$

де k – ваговий коефіцієнт;

g – витрата палива на тягу поїзда.

Для окремих фаз руху поїзда, а саме рушання та розгону; тяги; вибігу та гальмування визначено функції раціонального керування [4, 12, 13, 14, 15, 21].

Фаза **рушання та розгону** Φ^P передбачає поступове збільшення потужності локомотива до моменту виходу на обрану характеристику. Для визначення раціонального керування u^P , узагальненого для варіативних мас Q складу та ухилів i , шляхом виконання багатоваріантних тягових розрахунків для різних значень потужності дизеля $N_e(N_{ПКМ})$, визначено залежності витрати палива $g(s)$ та часу ходу поїзда $t(s)$ [22, 23, 24].

Для обробки результатів та узагальнення отриманих даних введено коефіцієнт питомої витрати палива при розгоні k_p , фізичний зміст якого – витрата палива за одну хвилину, що доводиться на одну тону маси складу при певній потужності силової установки.

$$k_p(N_{ПКМ}, i) = \frac{1000 \cdot g(u, s)}{Q \cdot t(v(s))}. \quad (10)$$

Цільова функція локальної оптимізації для фази рушання та розгону

$$k_p^{\Pi}(u, i) = \frac{d^2 k_p(u, i)}{du^2} \rightarrow \max. \quad (11)$$

Шляхом визначення точок максимальної кривизни залежностей $k_p(N_{ПКМ})$ для $Q \in [1,3] \cdot 10^3$ т та $i \in [-3,3]\%$ (рис. 3) визначено раціональні значення позиції контролера машиніста $N_{ПКМ}^{\text{рац}}(Q, i)$.

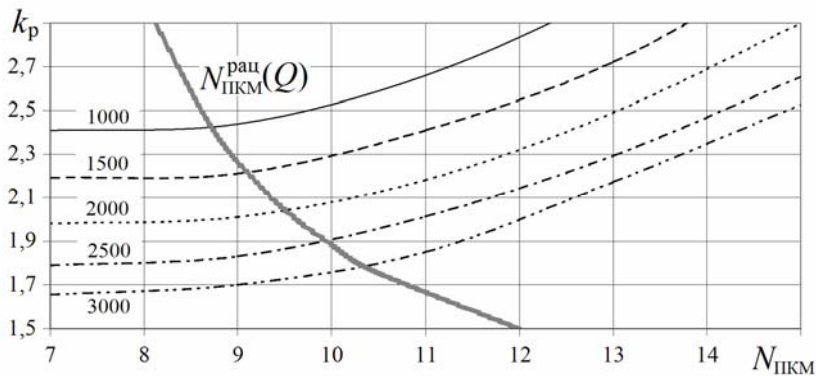


Рисунок 3 – Залежності $k_p(N_{ПКМ}, Q \in [1000; 3000])$ та раціональні позиції керування локомотивом $N_{ПКМ}^{\text{рац}}(Q)$ для ухилу $i = -1,5\%$

При розрахунку $N_{ПКМ}^{\text{рац}}(Q, i)$ для проміжних значень маси складу застосовуємо інтерполяцію в межах конкретного ухилу i для мас складу більше та менше даної, округленої до 10^3 т вгору $\bar{Q}$ та вниз $\underline{Q}$

$$N_{ПКМ}^{\text{рац}}(\underline{Q} \leq Q < \bar{Q}, i) = N_{ПКМ}^{\text{рац}}(\underline{Q}, i) \cdot \left(1 - \frac{Q - \underline{Q}}{\Delta Q}\right) + N_{ПКМ}^{\text{рац}}(\bar{Q}, i) \cdot \left(1 - \frac{\bar{Q} - Q}{\Delta Q}\right). \quad (12)$$

Графічна залежність $u^p = N_{\text{ПКМ}}^{\text{рац}}(Q, i)$ наведена на рис. 4.

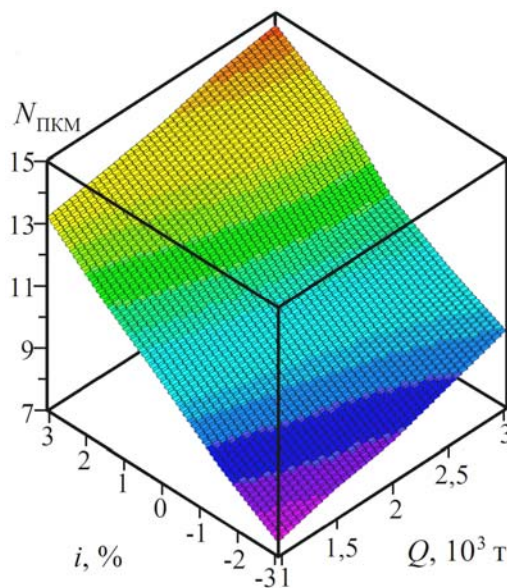


Рисунок 4 – Раціональні значення позиції контролера машиніста під час рушання та розгону $u^p = N_{\text{ПКМ}}^{\text{рац}}(Q, i)$

Фаза руху в **режимі тяги** Φ^T передбачає підтримування кінетичної енергії поїзда. Для визначення функції раціонального керування u^T проведено багатоваріантні тягові розрахунки.

Оскільки одним з вагомих параметрів, які впливають на витрату енергоресурсів є кінетична енергія, введено коефіцієнт питомої витрати палива під час руху на рівномірній швидкості, який враховує кінетичну енергію поїзда

$$k_{\text{рш}} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot g}{t \cdot Q \cdot v^2}. \quad (13)$$

Фізичний зміст $k_{\text{рш}}$ – годинна витрата палива, що приходить на 1 МДж кінетичної енергії поїзда, кг/год · МДж. Залежності $k_{\text{рш}}(N_{\text{ПКМ}})$ мають екстремум (мінімум) в діапазоні $N_{\text{ПКМ}} \in [0, 15]$ (рис. 5).

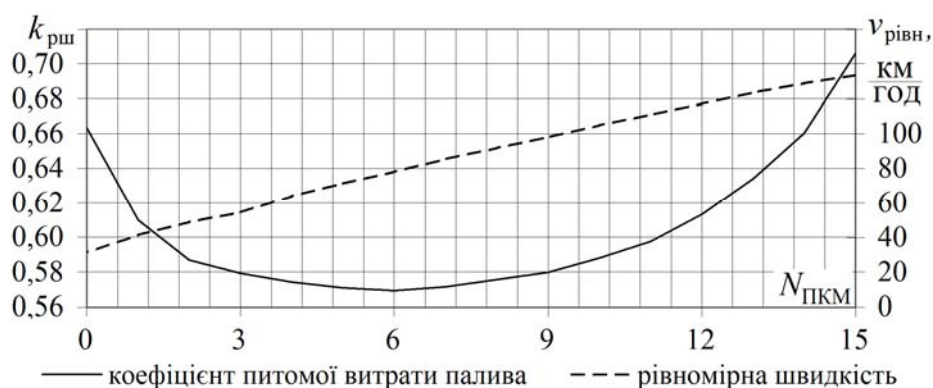


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта питомої витрати палива під час руху з рівномірною швидкістю від позиції контролера машиніста ($Q = 2000$ т, $i = -0,5$ ‰)

Цільова функція раціонального режиму керування для фази руху з увімкненими ТЕД [16]

$$N_{\text{ПКМ}}^{\text{рац}} \min_{k_{\text{рш}}} = \begin{cases} k_{\text{рш}} \rightarrow \min; \\ v_{\text{рівн}} \leq v^{\text{доп}}. \end{cases} \quad (14)$$

З урахуванням (12) отримуємо графічні залежності для раціонального керування $u^T = N_{\text{ПКМ}}^{\text{рац}}(Q, i)$ та відповідних рівномірних швидкостей $v_{\text{рівн}}^{\text{рац}}(N_{\text{ПКМ}}, Q, i)$ (рис. 6, 7).

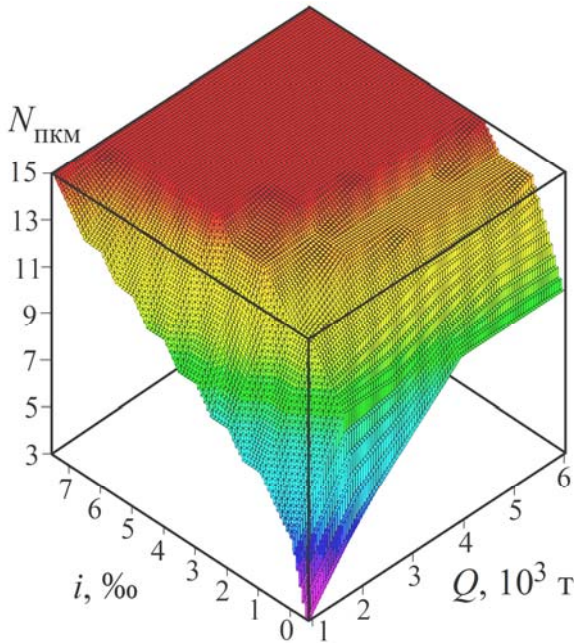


Рисунок 6 – Раціональні режими керування $N_{\text{ПКМ}}^{\text{рац}}(Q, i)$ для фази тяги

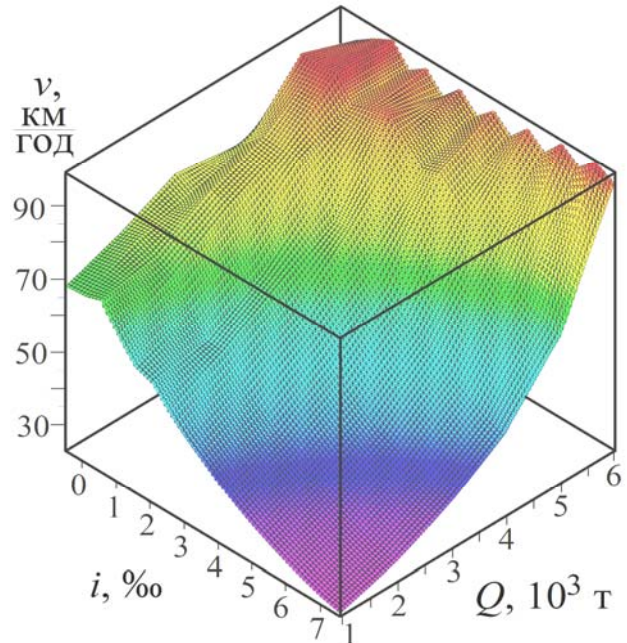


Рисунок 7 – Раціональні рівномірні швидкості $v_{\text{рівн}}^{\text{рац}}(N_{\text{ПКМ}}, Q, i)$ для фази тяги

Фаза **вибігу** Φ^B передбачає використання накопиченої кінетичної енергії поїзда. Залежно від поточної координати s , швидкості v та значення потенційної енергії $i(s)$, може відбуватись прискорення або сповільнення поїзда. При прискоренні поїзда та наближенні швидкості руху до допустимого значення $v_{\text{доп}}$, необхідно застосовувати регульовальне гальмування. Сповільнення поїзда приводить до зниження технічної швидкості та збільшення часу ходу поїзда. Для визначення функції раціонального керування u^B у фазі вибігу Φ^B проведено багатоваріантні тягові розрахунки [1].

За результатами тягових розрахунків отримані дані про витрату енергоресурсів $q(v_B, Q, i)$ та час ходу поїзда $t(v_B, Q, i)$ для величин ухилів $i \in [-0,5; 7,5]$ та зниження швидкостей під час вибігу $v_B \in [80; 0]$.

Для обробки результатів та узагальнення отриманих даних введено коефіцієнт енергоефективності вибігу k_B , фізичний зміст якого – годинна витрата палива, що відповідає зменшенню кінетичної енергії поїзда.

$$k_B = \frac{q \cdot Q \cdot (v^B)^2}{2 \cdot 10^6 \cdot t}. \quad (15)$$

Графічні залежності $k_B(v_B)$, $q(v_B)$ та $t(v_B)$ мають вигляд рис. 8.

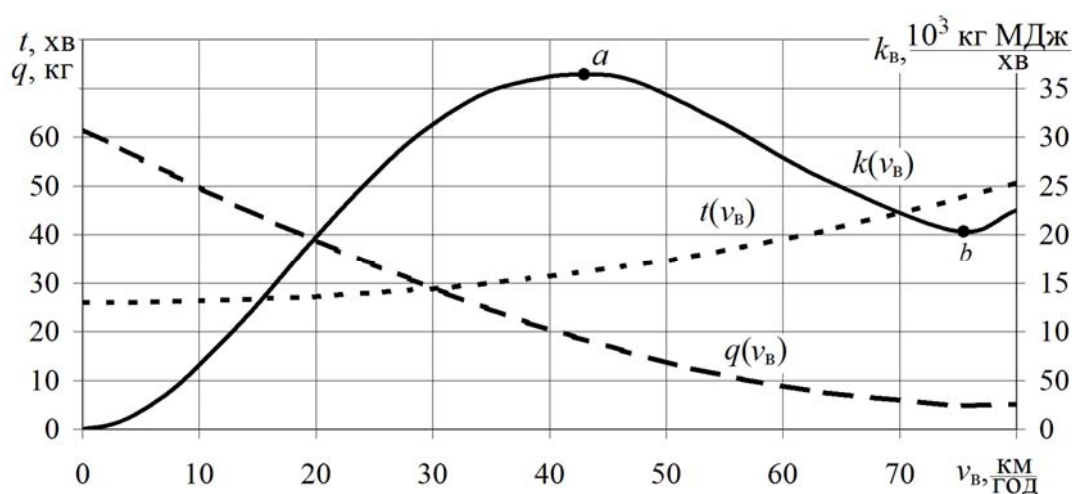


Рисунок 8 – Залежності витрати палива $q(v_B)$, часу ходу поїзда $t(v_B)$ та коефіцієнт енергоефективності вибігу $k_B(v_B)$ від зниження швидкості для маси складу $Q = 3000$ т та ухилу $i = 2,5$ ‰

В діапазоні зниження швидкості $v^B = 0 \div 43$ км/год значення k_B зростають за рахунок зниження кінетичної енергії поїзда. При $v^B = 43$ км/год (точка a) спостерігається екстремум. Подальше зниження значень коефіцієнта спричиняють зростання часу ходу поїзда t та зменшення витрати палива q до точки b ($v^B = 75$ км/год). Зростання значення коефіцієнта при $v^B > 75$ км/год спричиняє значне зниження технічної швидкості за рахунок підвищення інтенсивності часу ходу поїзда t . Отже, при регульовальному вимушеному зниженні швидкості доцільно змінювати швидкість до значення коефіцієнта k_B , що відповідає екстремумі в точці a , а при остаточному гальмуванні – до значення коефіцієнта k_B в точці b .

На підставі залежностей $k_B(v^B)$ для $i \in [-0,5; 7,5]$ ‰ та $Q \in [1000; 6000]$ т визначаємо екстремуми та відповідні швидкості (табл. 2, рис. 9, 10). Раціональне керування ТРС відповідає $u^B = v_{\text{рац}}^B(Q, i)$.

Таблиця 2

Раціональне керування u^B у режимі вибігу

Маса складу, 10^3 т	Значення $v_{\text{рац}}^B$ по ухилу i , ‰				
	-0,5	0	2,5	5	7,5
1	53/67	46/69	43/71	40/72	38/74
3	48/71	45/73	43/75	41/76	40/76
6	46/74	44/76	43/78	42/78	41/78

Примітка: у чисельнику – значення регульовального зниження швидкості; у знаменнику – значення зниження швидкості при гальмуванні до зупинки

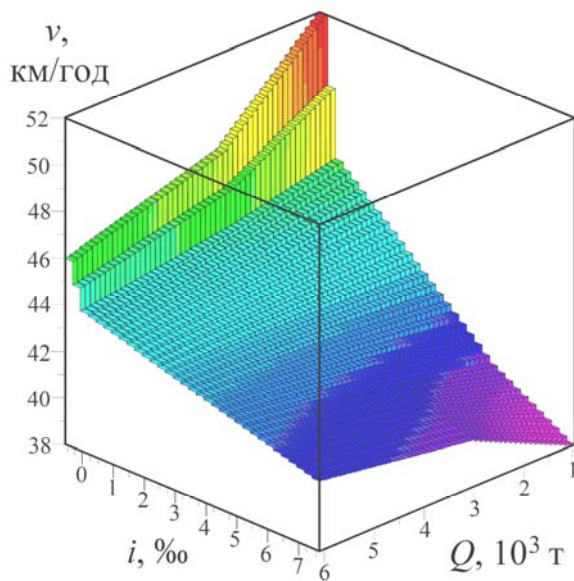


Рисунок 9 – Значення $v_{\text{рац}}^B(Q, i)$ при регулювальному зниженні швидкості

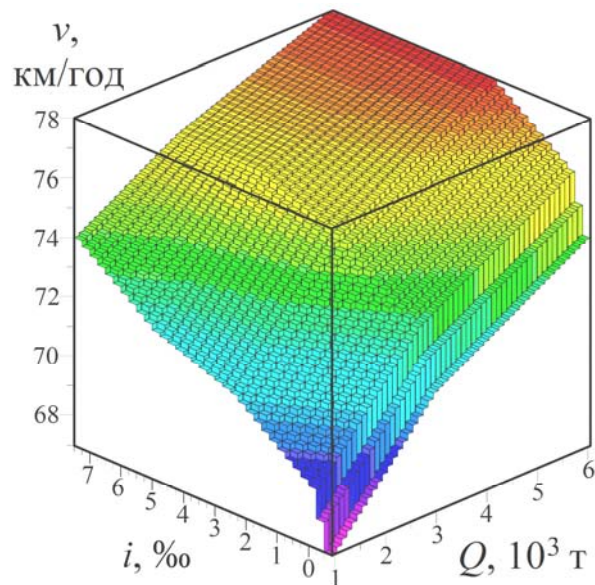


Рисунок 10 – Значення $v_{\text{рац}}^B(Q, i)$ при остаточному гальмуванні

Фаза *гальмування* $\Phi^Г$ передбачає зміну кінетичної енергії поїзда для його зупинки або регулювання швидкості шляхом створення зовнішньої сили.

Швидкість на початку гальмування та довжина гальмівного шляху є визначаючими параметрами для розрахунку руху поїздів у режимі гальмування. При цьому необхідно враховувати довжину гальмівного шляху $s_Г$, наявність гальмівних засобів в поїзді, що визначаються розрахунковим гальмівним коефіцієнтом ϑ_p , початкову $v_{\text{п}}$, кінцеву $v_{\text{к}}$ швидкість руху та ухили $\tilde{i}(s)$. Математичний взаємозв'язок між цими параметрами визначається рівнянням руху поїзда для випадку його руху при діючих гальмах.

Оскільки гальмівна сила розповсюджується уздовж складу хвилеподібно та гальмівні циліндри наповнюються за деяким законом $\vartheta_p(t, l_{\text{п}})$, то рівнодіюча сила r залежить також від часу t .

Для рішення задачі прицільного гальмування з точки остаточної зупинки поїзда $s = s_{\text{зуп}}$ будується крива гальмування до швидкості $v = v_{\text{кон}}$ в напрямку точки відправлення поїзда та складається її інтерполяційна функція $v_{\text{гальм}}(s)$. По мірі наближення поїзда до точки зупинки $s_{\text{зуп}}$ після перетину координати $s(v_{\text{кон}})$ змінюється інтервал ітерацій $\Delta s = 1$ м та в кожній ітерації перевіряється умова

$$v_j(s_j) \geq v_{\text{гальм}}(s_j). \quad (16)$$

За недотримання умови (16) будується крива гальмування. Таким чином одержуємо точку зупинки поїзда з точністю $s_j = s_{\text{зуп}}^{+1}$ м.

Розв'язання рівняння руху поїзда з використанням вищенаведених складових алгоритмів для окремих фаз руху виконується в слідуєчому порядку.

Розгін поїзда відбувається до моменту виходу на раціональну швидкість

$v_{\text{рац}}^B(Q, i)$ відповідно функції u^P . Відповідно функції u^T визначається раціональне керування на кожній ітерації рішення рівняння (4) або (5) та визначаються додаткові параметри: струм $I(s)$, ККД $\eta(s)$, сила тяги $F(s)$ та її питоме значення $f(s)$, витрата палива $q(s)$, температура перегріву ТЕД $\tau(s)$.

Для можливості узгодження траєкторії руху поїзда з графіком руху розв'язано рівняння руху поїзда у вигляді залежності час ходу поїзда – витрата енергоресурсів $q(t)$. Це досягається коригуванням раціональних рівномірних швидкостей, які задані функцією $v^{\text{рівн}} = f(s)$, та отримані на підставі раціональних залежностей $v_{\text{рац}}^{\text{рівн}}$, множенням на коефіцієнт коригування $k^{\text{кор}}$

$$v^{\text{рівн}}(s) = v_{\text{рац}}^{\text{рівн}}(s) \cdot k^{\text{кор}}. \quad (17)$$

Коефіцієнт $k^{\text{кор}}$ може набувати значень як менше одиниці (за наявності резерву часу), так і більше. При зміні коригувального коефіцієнта в межах $k^{\text{кор}} \in [1, 2; 0, 6]$ та в результаті виконаних тягових розрахунків отримано залежність витрати палива від часу ходу поїзда $q = f(t_x)$ для ділянки Волноваха – Пологи при масі складу $Q = 4933$ т (рис. 11).

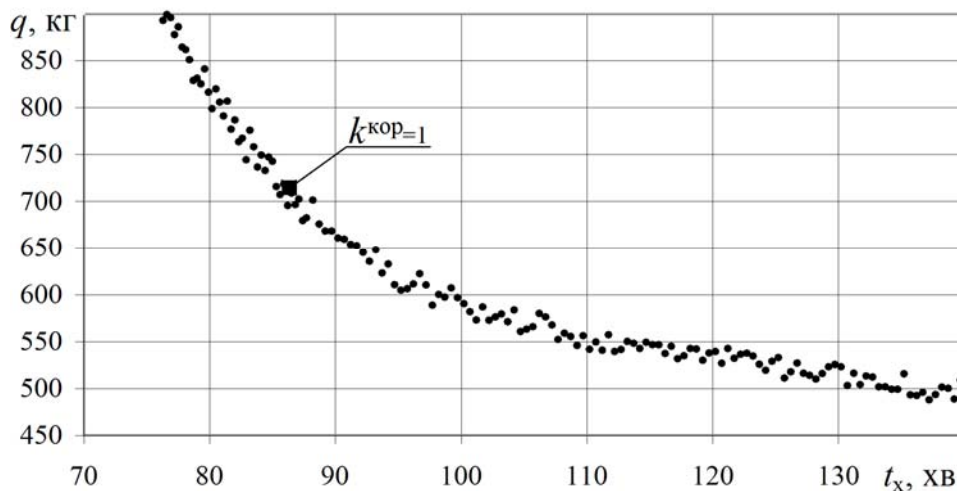


Рисунок 11 – Рішення рівняння руху поїзда у вигляді залежності витрата енергоресурсів – час ходу поїзда $q(t)$

В четвертому розділі виконано розробку апаратного-програмного комплексу реєстрації тягових параметрів локомотива для можливості застосування наведених алгоритмів в бортовій системі.

Запропоновано спосіб визначення сили тяги для тепловозів з електричною передачею потужності, який заснований на вимірюванні первинних параметрів потужності ТЕД: напруги $U_{\text{тед}}$, струму якоря $I_{\text{я}}$ та струму збудження $I_{\text{з}}$. Розроблено апаратне та програмне забезпечення виміру та обробки вказаних параметрів.

Програмна реалізація вищенаведених алгоритмів виконана за допомогою пакету символьних обчислень «Maple» [17, 18] з урахуванням [11].

В п'ятому розділі проведено експериментальні дослідження апаратної та програмної частини [10, 19] комплексу індивідуальних раціональних режимів ведення.

Точність апаратної частини визначено порівнянням розрахованої сили тяги, з визначеною за електричною потужністю $U \cdot I \cdot \eta_{\text{ТЕД}}$; з урахуванням магнітного потоку основних полюсів Φ_3 ; за навантажувальними характеристиками $E / n = f(I_3)$.

Інтегральна оцінка розбіжності запропонованого методу та визначення сили тяги за електричною потужністю

$$\Delta = \left(9,554 \cdot \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \frac{P_{\text{тед}}}{n_{\text{я}}} - \frac{30}{\pi} \cdot \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} I_{\text{я}} \cdot \left(\frac{E}{n} \right) \right) / \left(9,554 \cdot \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \frac{P_{\text{тед}}}{n_{\text{я}}} \right) \cdot 100. \quad (18)$$

складає $\Delta = 0,5 \%$.

Оцінку ефективності індивідуальних раціональних режимів ведення виконано порівнянням розрахованих траєкторій руху поїзда з: швидкіснимірною стрічкою; траєкторіями, отриманими за існуючими алгоритмами визначення раціональних режимів ведення; статистичними даних форм ТУ-3, 4526L.

Для можливості порівняння результатів тягових розрахунків, отриманих за індивідуальними раціональними режимами та методом Ліпеца–Лебедева, з урахуванням того, що отриманий час ходу поїзда та витрата палива не збігаються, введено узагальнюючий коефіцієнт k_{qt}^{m} , який враховує витрату палива q та час ходу поїзда t

$$k_{\text{qt}}^{\text{m}} = \sum q \cdot \sum t, \quad (19)$$

де m – метод тягових розрахунків.

Оцінку ефективності тягових розрахунків виконано за формулою

$$\Delta_{qt} = \frac{k_{\text{qt}}^{\text{m}} - q_{\text{qt}}^{\text{m}'}}{k_{\text{qt}}^{\text{m}}} \cdot 100, \quad (20)$$

де m, m' – методи тягових розрахунків, для яких виконується порівняння.

Ефективність методу індивідуальних раціональних режимів складає 2,2-3,2 % порівняно з методом Ліпеца–Лебедева.

Проведено аналіз фактичних даних за довідками 4526L результатів 15 поїздок у прямому напрямку та 10 поїздок у зворотному напрямку на ділянці Миколаїв–Долинське (довжина ділянки 157,5 км). З урахуванням того, що розрахований час для всіх поїздок не більший за фактичний, оцінку ефективності виконано за фактичною q^{Φ} та розрахованою q^{P} витратою палива

$$\Delta q = \frac{q^{\Phi} - q^{\text{P}}}{q^{\Phi}} \cdot 100. \quad (21)$$

Порівняння результатів показує, що ефективність методу індивідуальних раціональних режимів для ділянки Миколаїв–Долинське в прямому та зворотному напрямках складає 2-12 %.

Накладання розрахованої траєкторії на швидкостемірну стрічку дозволяє проаналізувати зміну швидкості та режиму керування з траєкторією реального поїзда, його перехідними процесами, динамікою прискорення та сповільнення та іншими факторами. За досліджувану обрано ділянку Пологи–Волноваха довжиною 134,4 км. Для порівняння обрано швидкостемірні стрічки поїздів масою $Q^{пр} = 4977$ т та $Q^{ЗВ} = 4993$ т. При цьому витрата дизельного палива обраних поїздок є мінімальною порівняно з поїздами схожої маси. Оцінку ефективності розрахованого раціонального режиму керування з урахуванням того, що час ходу поїзда є фіксованим, виконано за формулою (21). Розрахункове зменшення витрати палива складає 2,2-2,6 %.

В шостому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження раціональних режимів ведення. Виконані техніко-економічні розрахунки підтвердили ефективність впровадження апаратно-програмного комплексу індивідуальних раціональних режимів ведення поїзда. Розрахунковий термін окупності апаратно-програмного комплексу склав 6 місяців.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконаних досліджень автором вирішена науково-прикладна задача та отримані науково обґрунтовані результати, спрямовані на підвищення ефективності використання тепловозів за рахунок зниження витрати палива на тягу поїздів шляхом вибору індивідуальних раціональних режимів ведення.

1. На підставі аналізу літературних джерел встановлено, що задача зниження витрати паливо-енергетичних ресурсів на тягу може бути удосконалена за рахунок визначення індивідуальних раціональних режимів ведення певного поїзда.

2. Аналіз існуючих методів розв'язання рівняння руху поїзда та визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів показує, що перспективними є алгоритми та методики визначення енергозощаджуючих траєкторій руху та відповідного режиму керування, які відповідають високій швидкодії для можливості застосування в бортових системах локомотивів і базуються на нелінійному програмуванні з використанням комплексних критеріїв оптимізації, а саме: мінімізації витрати енергоресурсів та часу ходу поїзда.

3. Для виконання тягових розрахунків та визначення раціональних функцій керування локомотивом адаптована математична модель руху поїзда з урахуванням нелінійних залежностей характеристик дизеля, гальмівного обладнання, електричних та механічних елементів передачі потужності.

4. Перевірена точність та адекватність математичної моделі руху поїзда, а саме:

- визначення техніко-енергетичних параметрів локомотива – порівнянням розрахованих характеристик з характеристиками, наведеними у ПТР. Точність моделі складає 99 %;
- розв'язання рівняння руху поїзда – порівнянням результатів, отриманих за різними методами числового інтегрування диференціального рівняння руху поїзда. Точність моделі складає 98,5 %.

5. Шляхом розбиття траєкторії руху поїзда на окремі фази введено відповідні їм

коефіцієнти енергоефективності. На підставі аналізу залежностей коефіцієнтів визначено раціональні співвідношення між масою складу, значенням ухилу, позицією керування та швидкістю руху. Побудовано функції двох змінних (маси складу та ухилу) раціонального режиму керування локомотивом для окремих фаз руху, які дозволяють одержати індивідуальну енергозаощаджуючу траєкторію руху поїзда за одну ітерацію.

6. Для можливості врахування графікового часу руху при визначенні раціонального режиму керування шляхом варіацій побудови траєкторій руху на підставі первинної удосконалено метод виконання тягових розрахунків, який дозволяє отримати розв'язок рівняння руху поїзда у вигляді залежності час ходу поїзда – витрата енергоресурсів.

7. Розроблено апаратне та програмне забезпечення виміру та обробки тягових параметрів локомотива для визначення поточних даних про режим роботи та потужність ТРС для можливості застосування методу визначення індивідуальних раціональних режимів ведення в бортових системах локомотива.

8. Виконано оцінку ефективності індивідуальних раціональних режимів ведення порівнянням з результатами тягових розрахунків, отриманими за іншими методами, результатами фактичних поїздок, даними швидкостемірної стрічки. Одержані результати свідчать про те, що за рахунок використання індивідуальних раціональних режимів ведення поїзда економія енергоресурсів може складати від 2 до 12 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні праці:

1. Капіца М. І. Визначення тривалості вибігу локомотива при переході з режиму тяги в режим гальмування / М. І. Капіца, Д. М. Кислий // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 136. – С. 86–92.

2. Визначення енергозаощаджуючих режимів розгону поїздів / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, А. М. Афанасов, Д. М. Кислий // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – № 5 (59). – С. 40–52. – Google Scholar, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.

3. Боднар Б. Є. Визначення сили тяги локомотива з урахуванням нерівномірності навантаження колісно-моторних блоків / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, Д. М. Кислий // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2013. – № 6. – С. 63–71. – Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus.

4. Кислий Д. М. Визначення енергозаощаджуючих режимів ведення поїздів / Д. М. Кислий // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2016. – № 1(61). – С. 71–84. – Google Scholar, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.

5. Поліпшення техніко-енергетичних параметрів тепловозів за рахунок впровадження автоматизованих систем керування дизелем / М. І. Капіца, М. І. Мартишевський, Д. М. Кислий, І. І. Палій // Наука та прогрес транспорту. Вісник

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – № 3(57). – С. 176–185. – Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.

Додаткові праці:

6. Програмний комплекс для розрахунку раціональних режимів ведення поїзда тепловозами: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір / Кислий Д. М., Боднар Б. Є., Капіца М. І., Бобирь Д. В., Бульдович Д. Ю.; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – №64293. – Дата реєстрації 29.02.2016. – 1 с.

7. Спосіб визначення потужності дизеля: патент на корисну модель / Бондар Б. Є., Сердюк В. Н., Капіца М. І., Кислий Д. М., Крюков В. А., Опарін Р. І.; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. - 'u2009 00082; Заявл. 05.01.2009; Опубл. 25.06.2009, Бюл. № 12. - Введ. с 25.06.2009 по 25.06.2015. - 6 с.

8. Спосіб визначення потужності дизеля: патент на корисну модель / Бондар Б. Є., Капіца М. І., Кислий Д. М., Гончаров Є. О., Карнаух О. А.; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. - 'u2010 02337; Заявл. 02.03.2010; Опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19. - Введ. с 11.10.2010 по 11.10.2016. - 7 с.

9. Цифровий безконтактний тахометричний блок: патент на корисну модель / Сердюк В. Н., Кислий Д. М., Вабілев Ю. Р., Ращупкін Т. В.; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. - 'u2010 15625; Заявл. 24.12.2010; Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12. - Введ. с 25.06.2011 по 25.06.2017. - 4 с.

10. Пристрій для вимірювання величини струму тягових електричних машин тепловозів: патент на корисну модель / Сердюк В. Н., Кислий Д. М., Коренюк Р. О., Дацьков В. Ю., Пономарьов Д. А.; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 'u2010 14880; Заявл. 13.12.2010; Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12. - Введ. с 25.06.2011 по 25.06.2017. – 4 с.

11. Довбня Н. П. Удельное сопротивление в кривой от трения гребня / Н. П. Довбня, Л. Н. Бондаренко, Д. Н. Кислый // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – Хмельницький: Хмельницький державний університет, 2009. – № 1. – С. 18–19.

Праці апробаційного характеру:

12. Боднар Б. Є. Вибір раціональних режимів ведення приміських поїздів / Б. Є. Боднар, В. М. Ляшук, Д. В. Бобирь, В. С. Любка, Д. М. Кислий // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы докладов 70 международной научно-практической конференции, Дніпропетровськ, 2010. – С. 37.

13. Гончаров Є. О. Розробка заходів щодо зниження витрат енергоресурсів на тягу поїздів / Є. О. Гончаров, Д. В. Бобирь, Д. М. Кислий // Тези 70-ї наукової студентської конференції «Науково-технічний прогрес на залізничному транспорті». – Дніпропетровськ, 2010. – С. 34.

14. Боднар Б. Є. Система енергооптимального ведення приміського електропоїзда / Б. Є. Боднар, Д. В. Бобирь, В. С. Любка, Д. М. Кислий // Проблемы и

перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 71 Международной научно-практической конференции. – Днепропетровск, 2011 – С. 41.

15. Боднар Б. Є. Удосконалення тягових розрахунків для вантажних поїздів з електричною тягою / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, Д. В. Бобирь, Д. М. Кислий // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 71 Международной научно-практической конференции. – Днепропетровск, 2011 – С. 42.

16. Бобир Д. В. Визначення допустимих швидкостей руху по ділянці / Д. В. Бобир, Д. М. Кислий, В. В. Швець // Тези Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, магістрантів та студентів «Науково-технічний прогрес на транспорті». Секція «Механіки». – Дніпропетровськ, 2012. – С. 43.

17. Бобир Д. В. Вирішення рівняння руху поїзда з використанням програмного пакету MAPLE / Д. В. Бобир, Д. М. Кислий // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 72 международной научно-практической конференции. – Днепропетровск, 2012. – С. 28.

18. Бобир Д. В. Вирішення рівняння руху поїзда з використанням програмного пакету MAPLE / Д. В. Бобир, Д. М. Кислий // Тези Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, магістрантів та студентів «Науково-технічний прогрес на транспорті». Секція «Механіки». – Дніпропетровськ, 2012. – С. 46.

19. Боднар Б. Є. Визначення сили тяги локомотива з врахуванням нерівномірності навантаження колісно-моторних блоків / Б. Є. Боднар, Д. М. Кислий // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Тези 73 міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 5.

20. Боднар Б. Є. Удосконалення системи визначення сили тяги локомотива за рахунок врахування нерівномірності навантаження колісно-моторних блоків // Б. Є. Боднар, Д. М. Кислий, В. С. Любка // Сучасні проблеми розвитку інтелектуальних систем транспорту: Тези 74 Міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ, 2014 – С. 17.

21. Боднар Б. Є. Економія енергоресурсів за допомогою застосування раціональних режимів ведення поїздів / Б. Є. Боднар, Д. В. Бобир, Д. М. Кислий // Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности: Материалы V Международной научно-практической конференции. – Воловец, 2014. – С. 24-25.

22. Боднар Б. Є. Визначення раціональних траєкторій руху поїздів при рушанні та наборі швидкості / Б. Є. Боднар, Д. М. Кислий, В. С. Любка // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Матеріали 74 Міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 5-6.

23. Боднар Б. Є. Енергозберігаючі режими розгону поїздів / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, Д. М. Кислий // Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості: Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. – Воловець, 2015. – С. 18-19.

24. Боднар Б. Є. Визначення енергозощаджуючих режимів розгону поїздів / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, Д. М. Кислий // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Матеріали 75 Міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 3-4.

АНОТАЦІЯ

Кислий Д.М. Підвищення енергоефективності ведення вантажних поїздів тепловозами. 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 – Дніпро, 2016.

Дисертаційна робота присвячена зниженню експлуатаційних витрат на тягу поїздів за рахунок вибору економічно обґрунтованих індивідуальних режимів ведення. В роботі, за допомогою імітаційної математичної моделі поїзда, вирішено задачу визначення раціонального керування локомотивом для окремих фаз руху та визначено відповідні функціональні залежності. Функції раціонального керування дають змогу обчислювати енергозаощаджуючу траєкторію руху поїзда без врахування графікового часу. Також, використовуючи метод локальних варіацій, рівняння руху поїзда розв'язано у вигляді залежності співвідношення витрати енергоресурсів – часу ходу поїзда, що дає змогу враховувати графік руху поїздів. Для можливості застосування методу визначення індивідуальних раціональних режимів ведення в бортових системах розроблено апаратне забезпечення обробки тягових параметрів локомотива.

Результати порівняння тягових розрахунків, виконаних за алгоритмами розрахунку індивідуальних раціональних режимів з тяговими розрахунками, виконаними за іншими методами та фактичними даними поїздок свідчать про те, що ефективність використання розглянутих в роботі алгоритмів складає 2-12 %.

ANNOTATION

Kislyj D. N. Increasing the energy efficiency freight trains conducting by diesel locomotives. Dissertation paper for a graduate degree of candidate of technical sciences in speciality 05.22.07 – railway rolling stock and train traction. – Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan. – Dnipro, 2016.

Dissertation is devoted to the operating reduce train traction expenses by choosing economically justified conduct of the individual regimes. In this paper, using a mathematical simulation model trains, solved the problem of the definition of rational management locomotive for the individual phases of motion and compiled relevant functional dependencies. rational management energy-saving functions allow you to calculate the trajectory of train movement, excluding the timetable. Also, using the method of local variations, equation of train movement is solved in a dependency ratio of fuel consumption – the time of train movement, which allows to take into account the schedule of trains. For the possibility of using method of definition the individual modes of rational conduct in onboard systems the hardware has been developed to process locomotive parameters.

The results of the comparison of traction calculations performed by the calculation algorithms of individual rational regimes of traction calculations made by other methods and the actual travel data indicate that the efficiency of the algorithms discussed in amounts of 2-12%.

АННОТАЦИЯ

Кислый Д. Н. Повышение энергоэффективности ведения грузовых поездов тепловозами. 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. – Днепр, 2016.

На сегодняшний день Укрзализныця является одним из крупнейших потребителей энергоресурсов в Украине. В условиях постоянного роста стоимости топливно-энергетических ресурсов возникает необходимость анализа и научного обоснования режимов управления локомотивом, их рационализации, расчета индивидуальных энергосберегающих режимных карт, корректирования графиков движения поездов.

Целью диссертационной работы является снижение эксплуатационных расходов на перемещение поезда по участку за счет выбора экономически обоснованных индивидуальных режимов ведения. Объект исследования – процесс движения поезда по участку. Предмет исследования – режим ведения поезда.

Для достижения поставленной цели использованы современные методы математического моделирования. При моделировании работы дизеля применены методы интерполяции и аппроксимации. Электрическая часть передачи тепловоза смоделирована в пакете символьных вычислений «Maple» с применением метода имитационного моделирования. Движение поезда смоделировано с помощью методов системного анализа, численных методов решения дифференциальных уравнений; точность и адекватность проверена методами численного решения дифференциальных уравнений: классического, Рунге-Кутты-Фельберга, Розенброка. Определение энергосберегающих режимов управления выполнено методами равномерного поиска, итераций, нелинейного программирования и локальных вариаций.

В диссертации получены новые научно обоснованные результаты, которые решают научную задачу повышения энергоэффективности ведения грузовых поездов тепловозами, что имеет существенное значение для железнодорожного транспорта. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- впервые определены функции двух переменных рационального режима управления тяговым подвижным составом для отдельных фаз движения, которые позволяют получить энергосберегающую траекторию движения поезда за одну итерацию за счет предварительно определенных рациональных соотношений масса состава – уклон – позиция управления и масса состава – уклон – скорость движения.

- усовершенствован метод выполнения тяговых расчетов за счет вычисления вариативных траекторий движения, который позволяет получить решение уравнения движения поезда в виде зависимости время хода поезда – расход энергоресурсов;

- получил дальнейшее развитие метод определения распределения времени хода поезда по перегонам на основании рациональных равномерных скоростей, что позволило вычислять энергосберегающую траекторию движения поезда с учетом графиков движения;

- получил дальнейшее развитие метод решения уравнения движения поезда с определением энергосберегающих режимов за счет использования метода

локальных вариаций, который позволил получить минимальный расход энергоресурсов при условии ограничения времени хода поезда;

- получил дальнейшее развитие метод усреднения уклонов за счет учета распределения массы по длине поезда и рационального интервала решения уравнения потенциальной энергии поезда, что позволило более точно учитывать ускоряюще-замедляющие силы;

- определены рациональные пределы применения и значения шага переменных интегрирования уравнения движения поезда, что позволило уменьшить количество вычислений без потери точности расчетов.

На основании полученных методов, методик алгоритмов, программного и аппаратного обеспечения созданы: методика определения энергосберегающего режима управления локомотивом, которая позволяет рассчитывать рациональное управление в отдельных фазах движения независимо от серии тепловоза, массы состава и профиля пути; программный комплекс для расчета индивидуальных режимных карт энергосберегающего ведения поездов для определенного участка и массы состава, который позволяет экономить до 12 % топливных ресурсов; аппаратный комплекс регистрации тяговых параметров локомотива для возможности применения программного комплекса в бортовой системе локомотива.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов и приложений, содержит 156 страниц, включая 126 страниц основного текста, 56 рисунков, 17 таблиц и список использованных источников из 145 наименований на 16 страницах, 10 приложений на 15 страницах.

Во введении приведена общая характеристика работы и обоснование актуальности темы диссертационной работы. В первом разделе определено, что задача выбора рациональных режимов управления тяговым подвижным составом (ТПС) решена не в полном объеме. Определены основные направления исследований: оптимизация режимов движения поездов; автоматизация и организация управляющей деятельности машиниста. Во втором разделе рассмотрен процесс перемещения поезда по участку. Для проведения исследований построена имитационная модель движения поезда, в которой поезд рассматривается как цепь с распределенной массой. Предложено усреднение уклонов профиля пути по длине поезда с учетом распределения массы состава и локомотива. При решении уравнения движения поезда предложено условием выбора шага переменных интегрирования исходить из равенства расстояний между смежными точками траектории движения поезда в координатах скорость – путь. Создана имитационную модель движения поезда, проверена ее точность и адекватность. В третьем разделе сформированы условие рациональности режима и целевая функция. Для отдельных фаз движения поезда, а именно трогания и разгона, тяги, выбега и торможения определены функции рационального управления. В четвертом разделе выполнена разработка аппаратно-программного комплекса регистрации тяговых параметров локомотива. В пятом разделе проведены экспериментальные исследования аппаратной и программной частей комплекса индивидуальных рациональных режимов ведения. В шестом разделе выполнено технико-экономическое обоснование внедрения рациональных режимов ведения.

Кислий Дмитро Миколайович

Підвищення енергоефективності ведення вантажних поїздів тепловозами

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку 18 квітня 2017 р. Формат 60x84/16

Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,00

Тираж 100 пр.

Дніпропетровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В.Лазаряна

Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності ДК №1315 від 31.03.2003 р.

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010