

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

На правах рукопису

Кислий Дмитро Миколайович

УДК 629.424:629.46.016.2/.5(043.5)

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВЕДЕННЯ ВАНТАЖНИХ
ПОЇЗДІВ ТЕПЛОВОЗАМИ**

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
доктор технічних наук,
професор Боднар Б. Є.

Дніпро – 2017

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ВЕДЕННЯ ПОЇЗДІВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	9
1.1 Аналіз математичних методів розв’язання рівняння руху поїзда	9
1.2 Аналіз робіт та стану проблеми підвищення енергоефективності руху поїздів.....	11
1.3 Аналіз методів рішення рівняння руху поїзда при гальмівних розрахунках.....	28
1.4 Постановка мети та задачі досліджень	34
Висновки до розділу 1	35
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ ПОЇЗДА.....	37
2.1 Вимоги до математичної моделі руху поїзда.....	37
2.2 Кінетична енергія поїзда та рівняння руху	39
2.3 Потенціальна енергія руху поїзда	41
2.4 Інтегрування рівняння руху поїзда	45
2.5 Визначення меж застосування та раціональних значень змінних інтегрування рівняння руху поїзда.....	49
2.6 Перевірка точності та адекватності моделі.....	51
Висновки до розділу 2	52
3 ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЗАОЩАДЖУЮЧИХ РЕЖИМІВ ВЕДЕННЯ ПОЇЗДІВ	54
3.1 Вибір критеріїв оптимальності.....	54
3.2 Математичне моделювання техніко-економічних характеристик локомотива.....	58
3.3 Визначення енергозаощаджуючих режимів керування локомотивом.....	66
3.4 Розв’язання задачі прицільного гальмування.....	84
3.5 Узгодження раціональної траєкторії руху поїзда з графіком	88
Висновки до розділу 3	90

4 РОЗРОБКА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ РЕЄСТРАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ЛОКОМОТИВА.....	92
4.1 Основні вимоги до апаратно-програмного комплексу реєстрації параметрів локомотива.....	92
4.2 Обробка сигналів. Вибір первинних датчиків контролю параметрів	93
4.2 Визначення потужності локомотива.....	96
4.3 Призначення та опис основних модулів програмної частини	98
Висновки до розділу 4.....	101
5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	103
5.1 Випробування системи реєстрації параметрів локомотива	103
5.2 Апробація програмної частини комплексу індивідуальних раціональних режимів ведення.....	108
Висновки до розділу 5	116
6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ВЕДЕННЯ.....	117
Висновки до розділу 6	123
ВИСНОВКИ.....	124
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	126
ДОДАТОК А. Інтегрування рівняння руху поїзда по змінній часу.....	142
ДОДАТОК Б. Результати розрахунків часу ходу поїзда та витрати палива у фазі розгону.....	144
ДОДАТОК В. Раціональні режими ведення поїзда в фазі розгону	146
ДОДАТОК Г. Раціональні режими керування у фазі тяги.....	147
ДОДАТОК Д. Залежності коефіцієнта енергоефективності вибігу k^B фази вибігу	149
ДОДАТОК Ж. Спрямлений профіль ділянки Пологи – Волноваха.....	150
ДОДАТОК З. Порівняння траєкторій руху поїзда.....	151
ДОДАТОК І. Програмний комплекс для розрахунку раціональних режимів ведення поїзда тепловозами	153
ДОДАТОК К. Пристрій для вимірювання величини струму тягових електричних машин тепловозів: патент на корисну модель	154
ДОДАТОК Л. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	155

ВСТУП

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 енергозаощаджуючих 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 ділянкою.

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 макромоделювання).

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 енергозаощаджуючих 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 обгрунтовані 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 енергозаощаджуючу 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 енергозаощаджуючу траєкторію руху поїзда з урахуванням графікового часу;

- набув подальшого розвитку метод рішення рівняння руху поїзда з визначенням енергозаощаджуючих 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 прискорювальні-сповільнювальні сили;

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

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

- методику визначення енергозаощаджуючого 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 енергозаощаджуючого ведення поїздів для певної ділянки та маси складу, який дозволяє заощаджувати 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 енергозаощаджуючих 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.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ВЕДЕННЯ ПОЇЗДІВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Аналіз математичних методів розв'язання рівняння руху поїзда

Рівняння руху поїзда є основним законом, який передбачає визначення фазових координат у кожній точці шляху.

У тягових розрахунках застосовують такі методи розв'язання диференціального рівняння руху поїзда: аналітичний, графічний, числовий і машинний. Спільною для всіх цих методів теоретичною основою є розв'язання рівняння руху у формі задачі Коші. Для цього використовують певні теоретичні підходи, відомі у прикладній математиці, механіці та технічній кібернетиці. До них належать правила лінеаризації нелінійних функцій; принцип малих відхилень змінних стану об'єкта; обчислення поточних координат рухомого об'єкта методом спостережності [7, 8, 9].

Графічний та метод сталих швидкостей використовується для розрахунків, які не потребують великої точності та не передбачають визначення енергоефективних режимів ведення поїздів.

Для аналітичного методу характерна велика кількість розрахунків, але він має вищу точність. Якщо розглядати його більш широко, то можна виділити такі методи розв'язання рівняння руху поїзда з визначенням енергоефективних режимів:

- варіаційне числення;
- принцип максимуму Понтрягіна;
- нелінійне програмування;
- динамічне програмування;
- векторна оптимізація.

Варіаційне числення є одним з найбільш важливих методів для розрахунків на основі класичного математичного аналізу [10]. Це розділ функціонального аналізу, у якому вивчаються варіації функціоналів. Функціонал – це оператор, множина значень якого складається з чисел. Для

руху поїзда функціонали враховують координату переміщення, швидкість, час, витрату енергоресурсів, прискорення тощо. При визначенні раціональних режимів ведення визначаються екстремуми функціоналів, що відповідають мінімізації змінних величин [11].

Принцип максимуму Понтрягіна, на відміну від класичного варіаційного числення, дозволяє розв'язувати задачі керування, у яких на керуючі параметри накладені обмеження, хоча зазвичай заздалегідь обумовлюється ряд властивостей розв'язку. Завдяки цьому принцип максимуму є основним математичним прийомом, який використовується для розрахунку оптимального режиму керування в багатьох важливих завданнях техніки [12].

Нелінійне програмування – розділ математичного програмування, який вивчає методи розв'язання екстремальних задач з нелінійною цільовою функцією або областю допустимих розв'язків, що визначена нелінійними обмеженнями. Задача нелінійного програмування – це задача вибору таких невід'ємних значень деяких змінних, підпорядкованих системі обмежень у формі нерівностей, за яких досягається максимум або мінімум цієї функції [13].

Метод динамічного програмування – один з найбільш потужних і широко відомих математичних методів сучасної теорії керування. Він передбачає розв'язання задач шляхом складання послідовності з підзадач таким чином: перший елемент послідовності має тривіальний розв'язок; останній елемент цієї послідовності – це вихідна задача; кожна задача цієї послідовності може бути розв'язана з використанням розв'язків підзадач з меншими порядком [14].

Векторна (багатокритеріальна) задача математичного програмування лежить в основі математичної моделі, яка описує будь-який технічний об'єкт [15]. Завдання багатокритеріальної оптимізації полягає в пошуку вектора цільових змінних, що задовольняє накладені обмеження, та оптимізуючої векторної функції, елементи якої відповідають цільовим функціям. Ці функції утворюють математичний опис критерію задовільності та, як правило, взаємно конфліктують [16]. У задачах векторної оптимізації принцип оптимальності визначає властивості оптимального розв'язку й дає відповідь на головне

питання – у якому сенсі оптимальний розв’язок перевершує всі інші допустимі розв’язки й дає правило пошуку цього оптимального розв’язку [15].

1.2 Аналіз робіт та стану проблеми підвищення енергоефективності руху поїздів

Значний внесок у вирішення проблеми визначення раціонального ведення поїздів внесли вчені та інженери, які виклали 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. Євдомахи, 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.

Розрахунок та оцінка траєкторій руху поїзда виконується на основі методів теорії оптимального керування з моделюванням процесу, що описує поведінку поїзда під впливом керуючих факторів і власного поточного стану. Визначення раціональних траєкторій виконується шляхом знаходження екстремумів заданої сукупності критеріїв, до яких відносять час, витрату енергоресурсів, швидкість, перегрів тягових електричних машин та ін.

Одним з найбільш поширених методів знаходження екстремумів функціоналів є метод Ейлера, який базується на теоремі варіаційного числення: якщо екстремум функціонала існує та досягається в класі кусково-гладких функцій, то він досягається лише на розв’язках рівняння Ейлера [17], які називають екстремалами. Оскільки на рух поїзда накладається велика кількість

обмежень, то для цього випадку існує узагальнена теорема Гернет: якщо екстремум функціонала в замкнутій області існує та досягається в класі кусково-гладких функцій, то він може досягатися тільки на комбінованих кривих, складених з відрізків екстремалей та частин межі області; крім того, у точках сполучення екстремалі та межі області дотичні до них повинні збігатися [18].

Задачею в цьому методі є знаходження (визначення) програми зміни швидкості $v(t)$, яка забезпечувала б задане переміщення поїзда по ділянці s , тобто визначення інтеграла [19]

$$s = \int_0^T v dt, \quad (1.1)$$

де t – час ходу поїзда;

T – загальний час ходу поїзда по ділянці,

з урахуванням рівноваги моментів на рушійних колісних парах

$$\mu = \dot{v} + \mu_0, \quad (1.2)$$

де μ_0 – момент опору руху поїзда на колісних парах.

Оптимізація рівняння виконується знаходженням мінімуму інтеграла

$$Q = \int_0^T \mu^2 dt = \int_0^T (\dot{v} + \mu_0)^2 dt, \quad (1.3)$$

При цьому рівняння (1.1) має задовольняти рівняння Ейлера

$$\frac{\partial l}{\partial v} - \frac{d}{dt} \frac{\partial l}{\partial \dot{v}} = 0, \quad (1.4)$$

де l – допоміжна функція Лагранжа,

$$l = (\dot{v} + \mu_0)^2 + \lambda v, \quad (1.5)$$

де λ – множник Лагранжа.

Після розв'язання рівняння (1.4) отримуємо рівняння Ейлера

$$\ddot{v} - \lambda = 0. \quad (1.6)$$

З урахуванням початкових даних отримуємо рівняння оптимальної програми керування [19]

$$v(t) = \frac{6s}{T^2} \left(t - \frac{t^2}{T} \right). \quad (1.7)$$

Виходячи з цього оптимальною є параболічна програма керування швидкістю поїзда. Якщо в рівняння (1.7) внести обмеження швидкості, то отримаємо криву зміни швидкості залежно від часу (рис. 1.1).

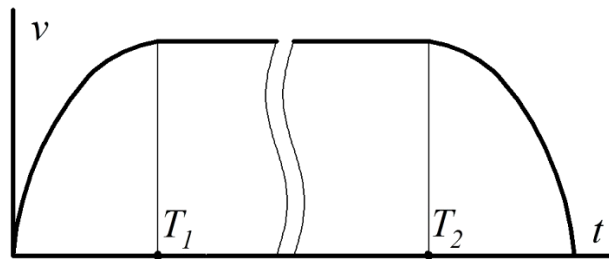


Рисунок 1.1 – Крива оптимальної зміни швидкості

У реальних умовах експлуатації тягові характеристики локомотивів та моторвагонного рухомого складу не дозволяють реалізовувати трапецеїдальну криву зміни швидкості.

Роботу тягових електромашин на налаштувальних ділянках електро-механічної характеристики слід розглядати як нелінійне обмеження прискорення.

Недоліками цього методу є:

- складність урахування великої кількості обмежень, які накладаються в реальних умовах;
- складність урахування змінних прискорювально-сповільнювальних зусиль, викликаних впливом профілю колії;
- складність моделювання перехідних процесів та реальних режимів роботи тягових електричних машин.

Метод динамічного програмування [20, 21] базується на принципі

оптимальності Беллмана: оптимальна стратегія керування має таку властивість, що, які б не були первинний стан та рішення в початковий момент, наступні рішення повинні утворювати оптимальну стратегію управління відносно стану, що отриманий при початковій стадії процесу [22].

Зниження витрат енергоресурсів за цим методом виконується мінімізацією цільової функції керування потужністю локомотива. Задача мінімізації спрощується при збільшенні кількості обмежень на рівняння руху поїзда за рахунок зменшення кількості наближень.

$$f(v, t, p) = \sum_{i=1}^n \Delta e_i(v_i, t_i, p_i) \rightarrow \min, \quad (1.8)$$

де p – потужність ТРС;

n – кількість етапів розв’язання рівняння руху поїзда;

Δe_i – витрата енергоресурсів на i кроці рішення.

Основне рівняння динамічного програмування для розв’язання поставленої задачі на основі (1.8):

$$f_i(v_i, t_i) = \frac{\min}{p_i} [f_{i-1}(v_{i-1}, t_{i-1}) + \Delta e(v_i, t_i, p_i)], \quad (1.9)$$

де $f_{i-1}(v_{i-1}, t_{i-1})$, $f_i(v_i, t_i)$ – мінімальне значення цільової функції відповідно за $(i-1)$ -й та i -й кроки розв’язання.

Введення обмеження за часом ходу поїзда по перегону

$$t_n = \int_{s_0}^{s_k} \frac{ds}{v} \quad (1.10)$$

передбачає використання множника Лагранжа λ [22], що частково спрощує задачу (1.9)

$$f_i(v_i) = \frac{\min}{p_i} [f_{i-1}(v_{i-1}) + \Delta e(v_i, t_i, p_i) + \lambda t_i]. \quad (1.11)$$

Для розв’язання рівняння руху поїзда за допомогою динамічного

програмування зручно використовувати метод скінченних приростів.

Недоліки даного методу такі:

– при зменшенні кроку інтегрування кількість варіантів розв'язку рівняння збільшується в геометричній прогресії, що зумовлює необхідність запасу машинного часу;

– порівняння варіантів розв'язку рівняння руху поїзда у вигляді залежності витрата енергоресурсів – час ходу поїзда $q(t)$ можливе лише в дискретних точках

$$\left\{ \begin{array}{cccccc} t_i & t_{i+1} & \dots & t_{n-1} & t_n \\ q_i & q_{i+1} & \dots & q_{n-1} & q_n \end{array} \right\} \quad (1.12)$$

без можливості визначення режиму ведення, який відповідає проміжним значенням;

– складність використання математичних моделей у бортових апаратно-програмних комплексах оперативного обчислення раціональних режимів ведення.

Тому для вказаного методу доцільно використовувати первинні траєкторії, отримані іншим способом.

Для розв'язання рівняння руху поїзда за методом Понтрягіна [23] використовується принцип максимуму. Цей метод доцільно застосовувати в системах з необхідністю високої швидкодії, у тому числі в бортових програмно-апаратних комплексах. Алгоритми методу Понтрягіна базуються на методі динамічного програмування.

При розв'язанні рівняння руху визначається клас допустимих керуючих впливів з множини кусково-неперервних вектор-функцій $u(t)$, що визначаються на певному відрізку часу $t_0 \leq t \leq t_1$ в кожний момент часу з області U . Серед усіх допустимих керуючих впливів, що переводять фазову точку з положення x_0 в x_1 , потрібно вибрати керування $u(t)^*$, при якому функціонал

$$\int_{t_0}^{t_1} f^0[x(t), u(t)] dt \rightarrow \min \quad (1.13)$$

прагне до мінімуму [24].

Для розв'язання рівняння руху поїзда складають систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \frac{de}{dt} &= \frac{p(u)}{\eta}; \\ \frac{ds}{dt} &= v; \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{R(u)}{Q}, \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

де e – витрата енергоресурсів;

p – реалізована потужність (або позиція контролера машиніста);

η – загальний ККД локомотива;

s – пройдений шлях;

R – рівнодіюча сила;

u – функція керування тягою;

Q – маса складу.

Для знаходження коренів системи рівнянь (1.14) складається гамільтоніан H

$$H = \psi_0 \frac{p(u)}{\eta} + \psi_1 \cdot v + \psi_2 \frac{R(u)}{m}, \quad (1.15)$$

де ψ_i – спряжені змінні Гамільтона.

Множники Гамільтона визначають із системи рівнянь з частинними похідними

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial H}{\partial e} &= \frac{d\psi_0}{dt}; \\ -\frac{\partial H}{\partial s} &= \frac{d\psi_1}{dt}; \\ -\frac{\partial H}{\partial v} &= \frac{d\psi_2}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

Недоліками цього методу є:

– необхідність великої кількості диференціальних обчислень як для рівняння руху поїзда, так і для спряженої функції Гамільтона.

Для підвищення точності розрахунків, що досягається зменшенням кроку інтегрування, та зменшення кількості обчислень А.М. Костромін в [25] запропонував обирати крок інтегрування пропорційним сталій часу поїзда $T_{ст}$.

$$T_{ст} = \frac{1}{\xi \cdot k_c}, \quad (1.17)$$

де ξ – коефіцієнт, який враховує масу поїзда та коефіцієнт інерції мас, що обертаються;

k_c – коефіцієнт стабілізації швидкості руху при зміні рівнодіючої сили,
 $k_c = -(\partial F / \partial v)$ [26].

У цьому випадку при збільшенні сталої часу, тобто коли швидкість та змінні величини, що залежать від швидкості, змінюються повільніше, крок інтегрування можна збільшити. Це не вплине на точність розрахунків, але значно зменшить час обчислень. З тієї ж причини при збільшенні абсолютної величини приведенного ухилу $i_{пр}$, крок інтегрування необхідно зменшити.

Варіаційний метод розв'язання рівняння руху поїзда Ю. П. Петрова [27] передбачає мінімізацію витрат енергоресурсів інтегруванням за змінною часу ходу поїзда з умовою виконання графіка руху поїздів [28, 29, 30]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{Qv^2}{2} \right) + \omega v = \eta p. \quad (1.18)$$

Витрата енергоресурсів G на прямування по перегону s_0 за час T в цьому методі розраховується інтегруванням рівняння

$$G = \int_0^T q dt = \frac{1}{\eta} \int_0^T \left(s''s' + \omega_1 s' + ks'^2 + k_1 s'^3 \right) dt + \int_0^T a dt, \quad (1.19)$$

де ω_1 – складова опору руху поїзда, що залежить від координати на профілі

колії;

k, k_1 – коефіцієнти опору руху поїзда, що залежать від швидкості руху;

a – коефіцієнт інтенсивності витрати палива, що залежить від реалізованої потужності.

Для визначення раціонального закону управління достатньо знайти функцію $s(t)$, що складає мінімум функціонала (1.19)

$$J = \int_0^T (s''s' + \omega_1 s' + ks'^2 + k_1 s'^3) dt \rightarrow \min. \quad (1.20)$$

При інтегруванні рівняння (1.19) необхідно ввести обмеження:

- обмеження потужності первинного двигуна $P \leq P_{\max}$;
- обмеження максимального прискорення $s'' \leq s''_{\max}$;
- обмеження максимальної швидкості, що враховує стан колії, а також тимчасові обмеження $s' \leq s'_{\max}$;
- обмеження для тепловозів, що пов'язане з неможливістю рекуперації палива $P \geq 0$.

Недоліки цього методу такі:

- облік витрати енергоресурсів пов'язаний лінійною залежністю з потужністю силової установки;
- координата початку гальмування встановлена заздалегідь, що створює додаткову складність прицільного гальмування;
- ККД передачі описаний константою, тобто створюється додаткова похибка при розрахунках.

У роботі [31] А. А. Босовим запропоновано метод оптимальності за адитивним критерієм. У рівнянні руху поїзда складовою частиною є перегрів обмоток тягових електричних машин у вигляді

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{-\tau + \tau_{\infty}(v, u)}{T(v, u)}, \quad (1.21)$$

де τ_{∞} – перегрів при встановленому режимі;

$T(v, u)$ – стала часу.

У цьому методі алгоритм знаходження оптимального режиму керування складається з елементарних операцій Δ_K , які утворюють область B . Для області B визначається оптимальна траєкторія X , яка перевіряється на якість керування $I = I[X, u]$. Опис елементарної операції $\Delta(B_K)$ виконано нижченаведеними методами:

- різницевих рівнянь;
- оптимальним за швидкодією;
- ковзаючий режим (пилоподібний);
- ковзаючий режим з обмеженням амплітуди;
- лінеаризації.

У роботі [32] А. А. Босов, Г. К. Гетьман розглянули оптимізацію тягових розрахунків за мінімальними значеннями двох показників – витрати часу на переміщення поїзда t та роботи сил опору руху A .

$$t = \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{v(s)} \rightarrow \min; \quad (1.22)$$

$$A = \int_{s_1}^{s_2} \omega(v) ds \rightarrow \min.$$

Оскільки при керуванні тягою за швидкодією $u_1(s)$ витрата часу буде мінімальною, то існує керування $u_2(s)$ з загальної множини $u(s) \in U$, при якому робота є мінімальною $A_2[u_2] = \min A[u]$. Під час розгляду непорівнюваних варіантів розв'язання рівняння руху поїзда V_α складається з множини траєкторій, серед яких існує оптимізована крива V^P . Отже при $t_2 < \underline{t}$ множина $V_\alpha(t_2)$ обмежена, опукла та компактна. При цьому оптимізація зводиться до розв'язання двох задач:

- виконання тягових розрахунків при керуванні за швидкодією;

– мінімізації сил опору руху поїзда при заданому часі ходу.

Задачу раціоналізації тягових розрахунків за методом непорівнюваних варіантів розглянули Б. Є. Боднар, А. А. Босов, Д. В. Бобырь, М. І. Капіца в [33, 34, 35]. Умовою раціональності режиму є мінімізація часу ходу поїзда та роботи сил опору руху

$$\left(\begin{array}{l} t[v(s)] \\ A[v(s)] \end{array} \right) \rightarrow \min. \quad (1.23)$$

Першим етапом визначається максимально можлива швидкість руху по ділянці з урахуванням усіх обмежень $v_{\max}(s)$, $s \in [0, l]$, що забезпечує мінімальний час ходу поїзда. Далі розраховується множина траєкторій

$$\tilde{V} = \{v(s) : v(s) = \alpha \cdot v_{\max}(s), s \in [0, l]\}. \quad (1.24)$$

Початкова швидкість v_0 задається у вигляді

$$v_0 = \max_{0 \leq s < l} v_{\max}(s) \quad (1.25)$$

та виконується побудова швидкості $v_*(s | \alpha, v_0)$ таким чином:

$$v_*(s | \alpha, v_0) = \begin{cases} v_{\max}(s), & \text{якщо } v_{\max}(s) < v_0; \\ v_0 + \alpha(v_{\max} - v_0), & \text{якщо } v_{\max}(s) \geq v_0. \end{cases} \quad (1.26)$$

Параметр α змінюється в межах $0 \leq \alpha \leq 1$. Характер множини траєкторій

$V_* = \{v_*(s | \alpha, v_0) : 0 \leq \alpha \leq 1; v_0 \in [\underline{v}, \bar{v}]\}$ наведено на рис. 1.2.

Вибір раціональної траєкторії з множини непорівнюваних варіантів виконується з допомогою розв'язання задачі на умовний екстремум [34]:

$$\sum_{i=1}^n A_i(t_i) \rightarrow \min. \quad (1.27)$$

Цей метод дозволив створити апаратно-програмний комплекс визначення індивідуальних раціональних режимів ведення.

Метод зниження енерговитрат на тягу поїздів, що базується на алгоритмах

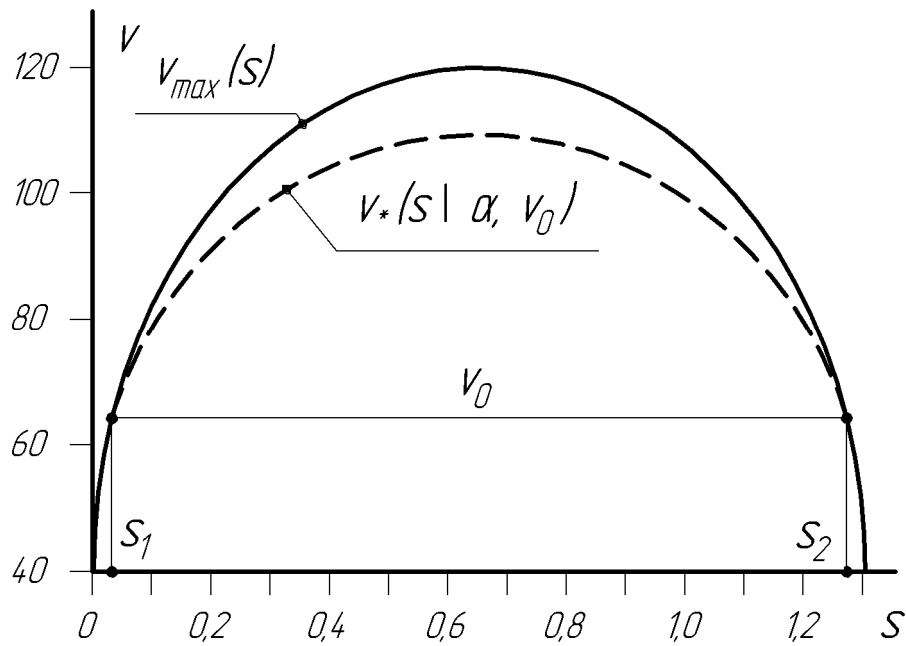


Рисунок 1.2 – Один з варіантів $v_*(s | \alpha, v_0)$ при фіксованому значенні α та v_0

динамічного програмування з обмеженням за часом ходу поїзда, що заданий графіком руху з урахуванням напруги контактної мережі, запропоновано в роботах [36, 37, 38, 39] Л. А. Барановим, Є. В. Єрофєєвим

$$A_e = \int_{s_n}^{s_k} \left[\frac{1}{\eta_T} \cdot F - \eta_P k_B R \right] ds, \quad (1.28)$$

де η_T , η_P – ККД локомотива відповідно в режимі тяги та рекуперації;

k_B – коефіцієнт розсіювання енергії в реостатах за відсутності приймачів.

З урахуванням керуючих впливів отримано залежність

$$A_e = \frac{P + Q}{\eta_T \cdot \xi} \int_{s_n}^{s_k} [u_f \cdot f_{\max}(v) - \eta \cdot u_r \cdot r_{\max}(v)] ds, \quad (1.29)$$

де u_f , u_r – керуючі впливи.

Надалі в роботах [40, 41, 42] Є. В. Єрофєєв, Н. І. Куренков, Я. М. Головічер запропонували систему автоматичного ведення поїздів з використанням ЕОМ та принципу максимуму [43] в задачах динамічного

програмування оптимального руху поїздів.

Система відслідковує заданий програмний час ходу поїзда у функції пройденого шляху.

Визначення поздовжніх сил поїзда визначається шляхом розв'язання диференціального рівняння руху поїзда для центру мас з уведенням коефіцієнтів при множниках сили тяги $f(v)$ та гальмування $b(v)$

$$v \frac{dv}{ds} = u_f \cdot f(v) - u_b \cdot b(v) - \omega(v) - g(s), \quad (1.30)$$

де $g(s)$ – поздовжні сили поїзда в координаті s .

Для отримання значення позиції контролера машиніста відповідні коефіцієнти апроксимуються за значенням потужності локомотива.

Коригування часу ходу поїзда за середньою швидкістю з урахуванням графікового руху поїздів, що прямують попереду й позаду, шляхом регулювання перервної сили тяги (між включеннями ТЕД) запропоновано в роботі [44]. Також у [45] враховано коефіцієнт повернення електричної енергії η , який визначено як математичне сподівання для цієї лінії.

Модель, яка описує мінімум узагальненої енергії, розглянуто в [46]

$$\Delta J = \int_s^{s+\Delta s_i} H^*(s, v, z) ds, \quad (1.31)$$

де H^* – узагальнена сила тяги;

z – позначення похідної dv/ds .

Отримана функція $v(s)$ при перерахунку з прискорювально-сповільнювальних сил H^* є ступеневою інтервалом Δs , а огинаюча є оптимальною траєкторією.

У математичній моделі руху поїзда, яку запропоновано Г. К. Гетьманом у [47], наводиться рівняння руху поїзда у вигляді функції, яка не включає масу складу Q як параметру, який впливає на питому прискорювальну силу

$$\bar{f}_{\text{кy}} = \begin{cases} \frac{1000 \cdot \psi_k(v) \cdot k_p}{1 + k_p}, & F_d \leq F_{3\text{ч}}; \\ F_k^* \left(\frac{v}{v_p} \right) \frac{1000 \cdot \psi_k(v) \cdot k_p}{(1 + k_p) k_F \cdot \beta_{\text{min}}}, & F_d \leq F_{\text{max}}, \end{cases} \quad (1.32)$$

де β_{min} – найбільший ступінь регулювання збудження;

k_p – коефіцієнт маси локомотива, $k_p = P / Q$ [47];

k_F – коефіцієнт сили тяги, $k_F = F_{3\text{ч}} / F_{\text{дг}}$ [47].

Використовуючи цю модель для конкретної залізничної лінії за відомого профілю колії $i(s)$, траєкторія руху поїзда $v(s)$ визначається лише режимом ведення та прийнятою величиною розрахункової швидкості.

Розв'язання рівняння руху поїзда передбачає певні умови: уся маса поїзда сконцентрована в одній точці (у центрі поїзда) та при цьому поїзд має довжину. При сталому режимі руху та на незмінному профілі колії це не вносить похибку. Однак при перехідних режимах руху в поїзді виникають власні сили інерції від динамічного переміщення вагонів.

У роботі [48] В. В. Скалозуб запропонував модель енергоефективного ведення поїзда, яка базується на динамічному програмуванні з використанням моделей неперервної апроксимації. Модель враховує диференційовані тарифи вартості електроенергії. Вихідними даними моделі є коефіцієнти відношення цін у різні періоди доби.

Існують методи визначення енергоефективних режимів, які охоплюють впливові фактори, починаючи з формування поїздів, один з яких запропоновано Є. П. Блохіним, О. М. Пшінько, В. В. Скалозубом, Г. В. Євдомахою [49]. Стохастична задача складається з таких рівнів:

- формування вагонопотоків за напрямками та визначення оптимальних міжпоїзних інтервалів та маси поїздів (у тому числі в різних часових тарифних зонах оплати електроенергії);

- система показників електричної тяги в умовах використання диференційованих тарифів з оплати електроенергії;

– вибір оптимальних режимів ведення поїздів по заданих ділянках (у тому числі в різні періоди доби для конкретних типів електровозів).

У цьому методі поїзд розглядається як рух гнучкої нитки з погонною масою та вирішується задача векторної оптимізації режимів ведення поїздів за багатьма параметрами в [49, 50].

Задача має вигляд оптимізаційної вектор-функції

$$\bar{F}(x, v, u, t) = (F_1(x, v, u, t), \dots, F_{10}(*)) \Rightarrow \underset{u \in \cap G_j, j=1 \dots 4}{\text{opt}}, \quad (1.33)$$

де $F_{1 \dots 10}$ – відповідно обсяг перевезень; узагальнена оцінка безпеки руху; вартість енергоресурсів; вимоги своєчасної доставки вантажів; витрата енергоресурсів; втрати в електричній мережі, що пов'язані з обраним режимом; рівень напруги в контактній мережі; час ходу; температура ТЕД; оцінка безпеки обраного режиму;

$G_{1 \dots 4}$ – відповідно множина керувань; ймовірність обмежень на допустимі траєкторії руху; ймовірність обмежень на можливі позиції керування; забезпечення оптимальним законом управління часу ходу поїзда.

Існують методи, що поєднують декілька математичних методів розрахунку енергооптимальних режимів ведення. Один з них запропонували Є. П. Блохін, В. В. Скалозуб, Г. В. Євдомаха, К. І. Железнов в [51, 52].

Ця модель оптимального регулятора передбачає, що на перегоні відомий деякий енергооптимальний режим руху у функції управління локомотивом $u(v, s, t)$. Змінна t в цій програмі надає можливість враховувати диференційовані тарифи з оплати електроенергії.

Первинна енергооптимальна траєкторія може бути розрахована методами динамічного програмування згідно з [27].

Під час руху поїзда та відхиленні від розрахункової траєкторії визначається відхилення швидкості [51]

$$x_j(s_i) = v_0(s_i) - v_j(s_i), \quad (1.34)$$

за яким визначається коефіцієнт зміни керування

$$y_j(s_i) = \left[A(D) - \frac{G(D)G(\alpha)}{A(\alpha)} \right] x_j(s_i) \quad (1.35)$$

та кінцева величина керування (струм)

$$I_{i+1,j} = I_{ij} + y_j(s_i), \quad (1.36)$$

яку можна апроксимувати в позицію управління локомотивом.

Жуковський М. Є. запропонував дві моделі поїзда: у вигляді суцільного стрижня та у вигляді ланцюга дискретних мас. Ці моделі визначають сили всередині поїзда, які дозволяють розглянути рушення поїзда, внутрішні сили при розтягнутих та стиснутих автотчепках, що є актуальним питанням при веденні поїзда за системою багатьох одиниць.

У моделі поїзда як системи дискретних мас, що з'єднані пружними зв'язками розглянуто вільне відносне переміщення вагонів при зміні навантажень автотчепних пристроїв (рис. 1.3), які описуються рівнянням [53]

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= M \frac{F}{M+m} - k(x+x'-a); \\ M \frac{d^2 x'}{dt^2} &= M \frac{F}{M+m} - k(x+x'-a), \end{aligned} \right\} \quad (1.37)$$

де $k(x+x'-a)$ – сила, що пов'язує відносний рух матеріальних точок m та M ;

m, M – відповідно маса локомотива та складу;

F – сила тяги локомотива;

a – початкова відстань між точками m та M .

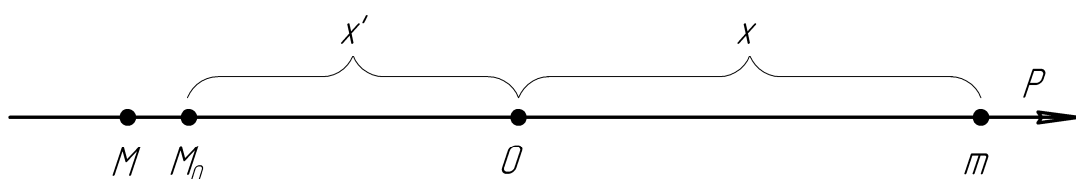


Рисунок 1.3 – Схема моделі поїзда як системи дискретних мас

Якщо розглядати поїзд як лінійну поздовжньо-динамічну систему, то існує модель, яку запропонували автори в [54]. Модель враховує динамічні властивості окремих вагонів складу, які розташовані на певній відстані від центру мас. Поздовжні сили окремого вагона описуються рівнянням

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t), \quad (1.38)$$

де m – маса вагона;

c, k – відповідно коефіцієнти демпфірування та жорсткості автозчепних пристроїв.

Недоліком цієї моделі є складність розрахунку поздовжніх прискорювально-сповільнювальних сил усього поїзда.

Дослідженнями перехідних режимів (рушання з місця, розгін, гальмування, рух по ломаному профілю тощо) займалися В. А. Лазарян, Є. П. Блохін. Вони базуються на моделюванні з використанням систем нелінійних диференціальних рівнянь. Модель дозволяє отримати поздовжні сили в поїзді, що мають хвильовий характер поширення.

Поїзд розглядається як система дискретних тіл [55], що з'єднані пружно-фрикційними амортизаторами з безінерційним демпфірувальним пристроєм. Поздовжні сили f_i визначаються для окремого вагона. Вони можуть бути як прискорювальними, так і сповільнювальними та описуються диференціальним рівнянням

$$\left. \begin{aligned} m_i \ddot{x}_i &= f_i - f_{i+1} + F_i; \\ f_0 &= f_{n+1} = 0, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \right\} \quad (1.39)$$

де x_i – лагранжева координата центру мас i -го вагона;

f_i – зусилля i -го зв'язку, яке є функцією стиснення (розтягнення) q_i та швидкістю зміни зусилля \dot{q}_i ;

F_i – зовнішня (стосовно вагона) прискорювально-сповільнювальна сила;

n – кількість вагонів.

При перерахунку у функції швидкості v отримана система рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \dot{v}_i &= \frac{f_i - f_{i+1}}{m_i} + \frac{F_i}{m_i}; \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n) \\ \dot{q}_i &= v_{i-1} - v_i; \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n). \end{aligned} \right\} \quad (1.40)$$

Якщо розглядати поїзд, що рухається по ламаному профілю, то задача визначення зовнішніх сил ускладнюється. В узагальненому вигляді рівнодіюча сила для локомотива є сумою сил [56]

$$F_1^* = P_1 + W_1 + B_1 + F_1, \quad (1.41)$$

де P_1 – складова сили тяжіння i -го екіпажа;

W_1 – сила основного опору поступальному руху i -го екіпажа;

B_1 – гальмівна сила i -го екіпажа;

F_1 – сила тяги локомотива згідно з тяговою характеристикою.

Під час руху поїзда по переломах поздовжнього профілю (рис. 1.4) складова рівнодіючої сили P_1 може бути визначена зі сплайн-функції

$$P_1 = \begin{cases} m_i \cdot g \cdot i_1, & x_i - L_{ci} \leq L_1; \\ m_i \cdot g \cdot \left(i_1 + \frac{y}{R_1} \right), & 0 < y \leq l_1 \quad (y = x_i - L_{ci} - L_1); \\ m_i \cdot g \cdot i_2, & 0 < y \leq L_2 \quad (y = x_i - L_{ci} - L_1 - l_2); \\ m_i \cdot g \cdot \left(i_1 + \frac{y}{R_2} \right), & 0 < y \leq L_2 \quad (y = x_i - L_{ci} - L_1 - l_2 - L_2); \\ \dots & \\ m_i \cdot g \cdot i_k, & 0 < y \leq L_k \quad \left(y = x_i - L_{ci} - \sum_{j=1}^{k-1} [L_j + l_j] \right); \\ m_i \cdot g \cdot \left(i_k + \frac{y}{R_k} \right), & 0 < y \leq l_k \quad \left(y = x_i - L_{ci} - \sum_{j=1}^{k-1} [L_j + l_j] - l_k \right), \end{cases} \quad (1.42)$$

де L_{ci} – довжина частини складу, що розташована попереду i -го екіпажа.

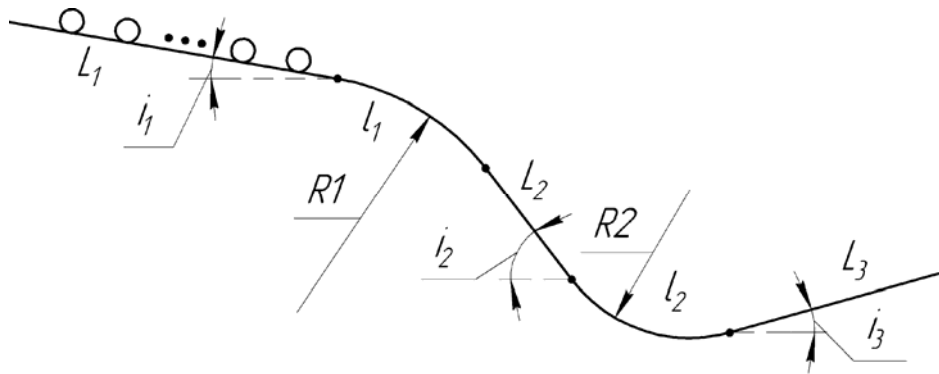


Рисунок 1.4 – Схема переломів поздовжнього профілю колії

Величину ухилу i_k на спуску, коли складова сили тяжіння відіграє роль прискорювальної сили, враховують додатною, а на підйомі – від’ємною; величину $1/R_k$ вважають додатною при опуклій спряженій кривій та від’ємною при увігнутій.

Цей метод дозволяє врахувати рівнодіючу силу як вектор, що залежить від хвильових коливань поїзда з врахуванням прискорювально-сповільнювальних сил від профілю колії та довжини поїзда. Недоліком описаного методу є те, що необхідно виконувати велику кількість диференціальних обчислень, які потребують великої кількості машинного часу.

В З. З. Рудяков [57] автор розглянув основні закономірності, що стосуються рушання з місця та розгону. Розрахунково та практично обґрунтовано значення сили тяги для пускового періоду рушання тепловоза. Надано рекомендації стосовно застосування прискорювальної сили при подоланні швидкісного підйому з використанням кінетичної енергії поїзда.

1.3 Аналіз методів рішення рівняння руху поїзда при гальмівних розрахунках

Зупинний шлях – це відстань, необхідна для зупинки транспортного засобу, що рухається зі швидкістю v_0 . Вказана відстань x_3 визначається за виразом [58, 59]

$$x_3 = x_1 + x_2 + x_3, \quad (1.43)$$

де x_1 – відстань, пройдена транспортним засобом за час реакції машиніста

на виниклу перешкоду;

x_2 – відстань, пройдена транспортним засобом за час підготовки його гальмівної системи до робочого стану;

x_3 – відстань, пройдена транспортним засобом від моменту приведення гальмівної системи в робочий стан до повної зупинки (дійсна гальмівна відстань).

Відстань x_1 визначається за виразом

$$x_1 = v_0 \cdot t_1, \quad (1.44)$$

де v_0 – швидкість руху транспортного засобу в момент виникнення небезпеки;

t_1 – час реакції машиніста на перешкоду.

Час реакції (протидії нервової системи зовнішній дії) є індивідуальним. Він залежить від характеру дії та психофізіологічних особливостей особистості. Таким чином, завдання визначення відстані зводиться до визначення часу реакції машиніста з урахуванням характеру зовнішніх подразників (динамічних, статичних) та психофізіологічних особливостей особистості.

Згідно з [58, 60] при раптовій появі перешкоди тривалість реакції машиніста рекомендується визначати за такою структурною формулою:

$$t_1 = k_3 [t_H + k_2 (t_C - t_H)] = t_H k_3 [1 + k_2 (k_1 - 1)], \quad (1.45)$$

де t_0, t_y – тривалість реакції машиніста в умовах неспання та стомлення

відповідно, $t_H = 0,4 \div 0,8$ с. [61];

k_1, k_3, k_2 – коефіцієнти, що враховують вплив на стомлюваність нервової системи за різних факторів [62].

Коефіцієнт k_1 є відношенням тривалості реакцій t_C/t_H . У [63] рекомендовано приймати величину $k_1 = 1,5 \div 3$ [63]. Величину k_3 рекомендується приймати в межах $1 \div 1,3$. Числове значення k_2 визначається в результаті спеціальних досліджень і на сьогодні його, залежно від відпрацьованих машиністом годин пропонується приймати в межах $k_2 = 1 \div 1,5$

[58]. Детальніше визначення часу реакції викладено в [58, 60, 63].

Сума $(x_2 + x_3)$ є шляхом гальмування, тобто це відстань, яку проходить поїзд від моменту повороту РКМ або крана екстреного гальмування в гальмівне положення до повної зупинки поїзда.

Відстань x_2 (у тягових розрахунках позначається S_{Π}) поїзд проходить від моменту повороту РКМ до моменту досягнення розрахункової сили натискання гальмівних колодок. Ділянка шляху протяжністю x_2 називається ділянкою підготовки до гальмування, або підготовчим шляхом [64].

У класичній постановці тягових розрахунків приймається, що шлях підготовки гальм до дії поїзд проходить з постійною швидкістю, тобто

$$S_{\Pi} = v_0 \cdot t_{\Pi}, \quad (1.46)$$

де v_0 – швидкість поїзда в початковий момент;

t_{Π} – час підготовки гальм до дії (час поширення гальмівної хвилі по складу і часткового наповнення гальмівних циліндрів).

Відповідно до рекомендацій [64] час підготовки гальм до дії при класичному підході визначається за такими виразами:

– для одинично прямуючого вантажного локомотива та для вантажних складів довжиною до $n_0 \leq 200$ осей при автоматичних гальмах

$$t_{\Pi} = 7 - \frac{10i}{b_T}; \quad (1.47)$$

– для вантажних складів довжиною $200 \leq n_0 \leq 300$ осей

$$t_{\Pi} = 10 - \frac{15i}{b_T}, \quad (1.48)$$

де i – величина ухилу ділянки профілю, на яких розташований поїзд в момент початку гальмування;

b_2 – питома гальмівна сила.

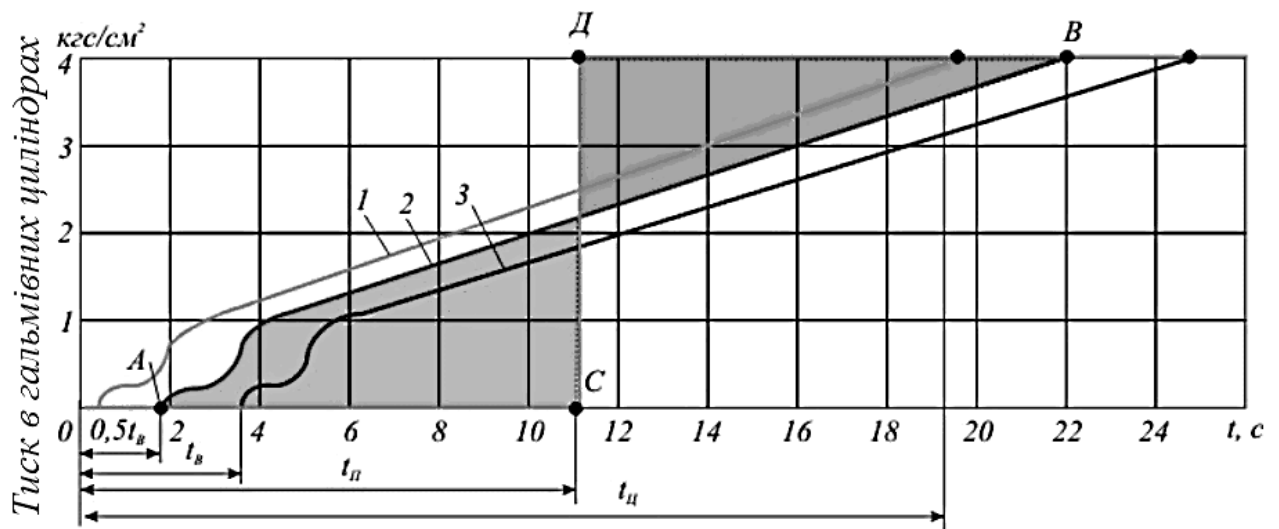
У сформованій практиці виконання тягових розрахунків прийнято

вважати, що шлях підготовки до гальмування поїзд проходить з постійною швидкістю [64]. Насправді ж на цій ділянці шляху відбувається перехід з режиму тяги або холостого ходу в режим гальмування, тобто рух поїзда на початку здійснюється під дією сил основного та додаткового опорів, а потім до них додається ще й гальмівна сила.

Таким чином, при класичному підході до розрахунку довжини шляху підготовки гальм до дії приймаються такі спрощення.

При визначенні часу підготовки гальм до дії реальна діаграма наповнення середнього гальмівного циліндра поїзда замінюється умовною стрибкоподібною (рис. 1.5).

При визначенні довжини шляху підготовки гальм до дії передбачається рівномірний рух поїзда на всій ділянці шляху підготовки. Насправді ж рух поїзда на цій ділянці є рівносповільненим або рівноприскореним (залежно від режиму руху перед гальмуванням – тяга або вибіг та співвідношення основного й додаткового опорів руху).



1, 2, 3 – тиск повітря в гальмівних циліндрах першого, середнього та останнього вагона відповідно; *CD* – умовна лінія наповнення гальмівних циліндрів складу; $0,5t_B$ – середній час поширення гальмування по поїзду; $t_{ц}$ – час наповнення гальмівного циліндра

Рисунок 1.5 – Діаграма наповнення гальмівних циліндрів у вантажному поїзді довжиною $n_0 = 200$ осей при екстремому гальмуванні

У роботах [58, 65] наведена уточнена методика визначення довжини зупинного шляху поїзда, де складено та розв'язано диференціальне рівняння руху поїзда на ділянці підготовки гальм до дії. Диференціальне рівняння отримано в припущенні, що при підготовчому шляху гальмування на поїзд уже діє гальмівна сила (починаючи з моменту переведення РКМ), що суперечить прийнятому в класичних тягових розрахунках припущенню – гальмівна сила діє на поїзд після проходження шляху підготовки, причому відразу з розрахунковим значенням.

Згідно з [58] рівняння руху поїзда на ділянці підготовки до гальмування має такий вигляд:

$$\ddot{x} = - \left[A + B\dot{x} + Cx^2 + \frac{\dot{x} + \gamma}{n\dot{x} + \gamma} \alpha \eta t \right], \quad (1.49)$$

де \ddot{x} , \dot{x} – прискорення та швидкість поїзда відповідно;

α , γ , n – постійні величини, залежні від матеріалу гальмівних колодок;

t – час.

$$A = \frac{Pa_1 + Q(a_2 + d) + (P + Q)i}{m}; \quad (1.50)$$

$$B = \frac{Pb_1 + Qb_2}{m}; \quad (1.51)$$

$$C = \frac{Pc_1 + Qc_2}{m}; \quad (1.52)$$

$$\eta = \frac{10000(P + Q)}{mt_2}, \quad (1.53)$$

де P – вага локомотива;

Q – вага складу;

t_2 – час підготовки гальм до дії;

$a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, d$ – емпіричні коефіцієнти, що входять до формули основного питомої опору руху й залежні від

навантаження на вісь вагона, швидкості руху, конструкційних особливостей ходових частин рухомого складу та елементів верхньої будови колії;

Оскільки диференціальне рівняння (1.49) є нелінійним, то його розв'язання в [58] рекомендують виконувати з припущенням про незмінність швидкості на ділянці підготовки до гальмування при визначенні складових питомого опору, тобто в правій частині рівняння (1.49). У такому випадку рівняння спрощується й набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= -(\xi + \xi_1 t), \\ \xi &= A + Bv_0 + Cv_0^2 = \text{const}; \\ \xi_1 &= \varphi\eta = \alpha \frac{(v_0 + \gamma)}{nv_0 + \gamma} \eta = \text{const}.\end{aligned}\quad (1.54)$$

Після інтегрування рівняння (1.54) отримаємо:

– для швидкості

$$\dot{x} = -\xi t - 0,5\xi_1 t^2 + C_1; \quad (1.55)$$

– для шляху

$$x = -0,5\xi t^2 - 0,167\xi_1 t^3 + C_1 t + C_2, \quad (1.56)$$

де C_1, C_2 – сталі інтегрування, що визначаються за початковими умовами $t = 0$,

$$\dot{x} = v_0, \quad x = 0.$$

Підставляючи вищевказані початкові умови в рівняння (1.55)–(1.56), визначимо що $C_1 = v_0, C_2 = 0$.

З урахуванням сталих інтегрування швидкості у кінці шляху підготовки гальм до дії та довжину шляху підготовки рекомендовано визначати за такими виразами відповідно:

$$\dot{x} = v_0 - \xi t_2 - 0,5\xi_1 t_2^2; \quad (1.57)$$

$$x = v_0 t_2 - 0,5\xi t_2^2 - 0,167\xi_1 t_2^3. \quad (1.58)$$

Таким чином, в [58, 65] інтегрування ведеться за часом (в інтервалі, визначеному за формулами (1.47)-(1.48), рекомендованими в [66, 64]), рівняння руху поїзда знаходять вже у режимі гальмування з максимальним значенням гальмівної сили, що відповідно приводить до меншого значення довжини підготовки гальм до дії порівняно зі значенням, знайденим за формулою (1.46), рекомендованою в [66].

1.4 Постановка мети та задачі досліджень

Розв'язання задачі визначення раціонального режиму керування локомотивом зводиться до процесу вибору керуючих впливів u на ділянці руху поїзда s із заданими характеристиками (параметри локомотива, маса складу Q , довжина поїзда та ін.), що забезпечують оптимальне (або наближене до оптимального) значення деякого критерію оптимальності. До керуючих впливів можна віднести регулювання потужності дизеля тепловоза $N_e(u)$ та створення гальмівних сил $B(u)$. Як критерії оптимальності можуть прийматися різні технічні та економічні показники процесу переміщення поїзда.

Якщо розглядати процес руху поїзда на основі II закону Ньютона

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}, \quad (1.59)$$

де \vec{F} – вектор сили, прикладеної до тіла, Н;

m – маса тіла, кг;

\vec{a} – прискорення, м/с²,

з врахуванням прискорення

$$a = \frac{d^2 s}{dt^2}, \quad (1.60)$$

та опору руху поїзда, залежного від швидкості руху $w(v)$ та ухилів профілю колії $i(s)$, то можна сформулювати таку залежність:

$$F(u, v, s) = (P + Q) \cdot \frac{d^2 s}{dt^2}, \quad (1.61)$$

де P , Q – маса локомотива та складу відповідно.

На підставі вищевикладеного можна сформулювати задачу оптимізації: визначити режим керування локомотивом $u(s)$, який забезпечить раціональне значення витрат енергоресурсів на тягу поїздів. За мету дослідження приймаємо зниження експлуатаційних витрат на переміщення поїзда по ділянці за рахунок вибору економічно обґрунтованих індивідуальних режимів ведення.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

- побудувати математичну модель руху поїзда, адаптовану для розв’язання тягово-оптимізаційних задач;
- визначити адекватність та точність імітаційної моделі;
- розробити методику визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів для всіх фаз руху;
- розробити алгоритмічне та програмне забезпечення розрахунку команд керування поїздом;
- розробити апаратне забезпечення обробки параметрів локомотива;
- обґрунтувати економічну ефективність програмного та апаратного забезпечення.

Висновки до розділу 1

1. Наукові дослідження останніх років, виконані українськими й закордонними вченими та фахівцями, показують, що задача зниження витрати паливо-енергетичних ресурсів на тягу ще не вирішена остаточно через свою складність та багатогранність. Основним напрямом підвищення економії є використання раціональних режимів ведення поїздів. До того ж підвищити економічність можна шляхом визначення індивідуальних раціональних режимів окремого поїзда.

2. Відомі класичні методи оптимізації стосовно задачі визначення

раціональних режимів ведення поїздів з урахуванням усіх умов експлуатації та технічних характеристик виявляються досить трудомісткими та незручними для масового використання. Це зумовлює вибір найбільш впливових факторів на витрату паливо-енергетичних ресурсів.

3. Аналіз робіт у галузі оптимального керування показав, що найбільш перспективними є алгоритми оптимізації на базі нелінійного та динамічного програмування з використанням векторної оптимізації.

4. Огляд методів математичного моделювання руху поїзда показує, що найбільшу похибку при розрахунку швидкості та керування надають математичні моделі, у яких фізична модель поїзда розглядається як матеріальна точка. Найбільшу точність та адекватність мають математичні моделі, в яких поїзд враховується як нерозтяжна нитка, пружний стрижень та ланцюг твердих тіл, в тому числі з пружно-дисипативними зв'язками за рахунок більш точного врахування зміни енергії поїзда.

5. Сформована мета та задачі дослідження. Метою роботи є зниження експлуатаційних витрат на переміщення вантажного поїзда по ділянці за рахунок вибору економічно обґрунтованих індивідуальних режимів ведення.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ ПОЇЗДА

2.1 Вимоги до математичної моделі руху поїзда

Сучасна математика дає надзвичайно потужні й універсальні засоби дослідження. Практично кожне поняття в математиці, кожен математичний об'єкт, починаючи від поняття числа, є математичною моделлю. Під час побудови математичної моделі досліджуваного об'єкта чи явища виділяють ті його особливості, риси та деталі, які, з одного боку, містять більш-менш повну інформацію про об'єкт, а з іншого – допускають математичну формалізацію. Математична формалізація означає, що особливостям та деталям об'єкта можна поставити у відповідність певні адекватні математичні поняття: числа, функції, матриці тощо. Тоді зв'язки та відповідності, виявлені та передбачувані в досліджуваному об'єкті між окремими його деталями та складовими частинами, можна записати за допомогою математичних відношень: рівностей, нерівностей, рівнянь. У результаті маємо математичний опис досліджуваного процесу або явища, тобто його математичну модель. Однак побудована математична модель має відповідати таким вимогам як універсальність, адекватність, точність, економічність та ін.

Універсальність характеризує повноту відображення моделлю досліджуваних властивостей реального об'єкта. Для моделі руху поїзда універсальність виражається у можливості її використання для різних профілів ділянок, варіативних мас складу, серій локомотива та ін.

Адекватність моделі руху поїзда показує здатність відображати потрібні властивості об'єкта, а саме техніко-економічні характеристики, з похибкою, не вищою, ніж задана.

Точність оцінюється ступенем збігу значень характеристик реального об'єкта та значень відповідних характеристик, отриманих за допомогою моделей. Точність можна визначити порівнянням результатів реальної поїздки з розрахованими: дані швидкостемірної стрічки, витрата енергоресурсів, час ходу та ін.

Економічність визначається витратами ресурсів пам'яті ЕОМ та часу на реалізацію та експлуатацію моделі. Для моделей, які працюють на стаціонарних ЕОМ, економічність не є настільки ваговою вимогою порівняно з програмно-слідкуючими моделями оперативного прийняття рішення (бортовими), оскільки останні мають надавати інформацію в разі зміни факторів: сигналів світлофорів, температури перегріву електричних машин та ін.

Використання математичних моделей для опису фізичних об'єктів є загально визнаним та затребуваним. Для побудови моделі, що базується на фізичних законах і дає можливість обчислити точне значення будь-якої величини, у будь-який момент часу, доцільно використати детерміновану модель. Але зважаючи на певні невідомі чинники, такі як технічний стан тягового рухомого складу, основний опір руху складу та локомотива, поїзна ситуація та ін., ця задача не є детермінованою. Тому математична модель поїзда має враховувати ймовірність того, що деякі майбутні значення змінних будуть лежати в певному інтервалі. Така модель класифікується як стахостична.

При моделюванні руху поїзда останній розглядається як динамічна система, яка працює в усталеному режимі лише в окремих інтервалах часу. Перехідні процеси призводять до зміни всіх внутрішніх параметрів системи, серед яких потужність, струм, витрата палива та ін., та деяких зовнішніх: кінетична енергія поїзда, опір руху та ін. Тому за характером математична модель поїзда є динамічною.

Графічні методи тягових розрахунків передбачають використання дискретних значень деяких змінних, проте значення фазових координат не завжди відповідають цим вимогам. Числове інтегрування рівняння руху поїзда передбачає визначення фазових координат в окремих точках часу або шляху. Точність визначення зростає при зменшенні інтервалів ΔS або Δt . Але при цьому погіршується така вимога, як економічність. Отже, для підвищення точності розрахунків модель має відповідати неперервному типу [67]. Існує декілька методів, що дозволяють змоделювати рух поїздів відповідно до певних критеріїв оцінки ефективності [68].

2.2 Кінетична енергія поїзда та рівняння руху

В описі будь-якого процесу руху завжди фігурують три ключові величини. Це відстань (шлях), час та швидкість. Для розв'язання задач руху необхідно визначати швидкість, яка змінюється під дією прискорення, у кожен момент часу або в кожній точці шляху. На прискорення, відповідно до другого закону Ньютона, впливають зовнішні сили, як керовані (створюються вимушено під час процесу руху), так і некеровані (створюються незалежно від керуючих впливів). Для визначення вищевказаних параметрів – фазових координат руху та діючих сил необхідно скласти рівняння руху. Оскільки поїзд – це система з великою інерційністю, яка під час руху викликає зміну енергії в широкому діапазоні, то доцільно складати рівняння руху, виходячи з кінетичної енергії.

Під час руху на поїзд діє велика кількість сил. Якщо розглядати поїзд як матеріальну точку, то до них можна віднести силу тяги, силу опору, гальмівну силу та сили інерції. З урахуванням напрямку руху можна стверджувати, що сила тяги є прискорювальною силою, сили опору та гальмівна сила – сповільнювальними силами, а вектор сили інерції завжди діє в напрямку, що протилежний напрямку вектора прискорення.

Сила прискорення діє на поїзд лише при нерівномірному русі [69]. На подолання сили інерції T використовується робота керуючих сил, тобто сили тяги F та гальмівної сили B , дію яких можна представити у вигляді рівняння

$$T = m_{\Pi} \cdot a + m_{O} \cdot \alpha, \quad (2.1)$$

де m_{Π} , m_{O} – маси поїзда, що рухаються поступально та обертально відповідно;

a , α – поступальне та обертальне прискорення відповідно.

Масою, що рухається поступально m_{Π} , є маса рухомого складу. Масами, що рухаються обертально m_{O} , є колісні пари, якорі тягових електродвигунів, якорі підвагонних генераторів, тягові редуктори. На підставі теореми Кеніга про кінетичну енергію системи [70] можна стверджувати, що кінетична енергія

поїзда буде становити

$$E = \frac{m_{\Pi} \cdot v^2}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{m_i \cdot r_i^2 \cdot \omega_i^2}{2}. \quad (2.2)$$

Момент інерції частин рухомого складу, що обертаються, згідно з [71] виражено як $m_i \cdot r_i^2$. З урахуванням коефіцієнта інерції мас, що обертаються, $(1 + \gamma)$ у диференціальному вигляді кінетичну енергію поїзда можна записати так:

$$dE = m \cdot (1 + \gamma) \cdot v dv. \quad (2.3)$$

Згідно із законом про збереження енергії [72] $dA = dE$ та з урахуванням $\xi = 1,32 / (1 + \gamma)$ [73], диференціальне рівняння руху поїзда має вигляд

$$\xi \cdot r = \ddot{S}, \quad (2.4)$$

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

Рівняння руху поїзда у вигляді ланцюга з розподіленою масою на підставі другого закону Ньютона можна представити як систему диференціальних рівнянь [74]:

$$\begin{cases} \frac{dv}{ds} = \frac{R \cdot g}{v \cdot (P + Q)}, \\ \frac{dt}{ds} = \frac{1}{v}, \end{cases} \quad (2.5)$$

де P, Q – маса локомотива та складу відповідно.

Для розв'язання системи диференціальних рівнянь за допомогою числових методів кожен елемент профілю розбивається на кроки інтегрування ds (при інтегруванні по шляху) або dt (при інтегруванні по часу). Під кроком варіювання режимів ведення поїзда розуміють такий відрізок шляху ds , на якому режим руху не змінюється. У [75] приймали при виконанні тягових оптимізаційних розрахунків на ЕОМ величину кроку варіювання слід рівною $ds = 500 \div 1000$ м.

У процесі розв'язання диференціальних рівнянь руху поїзда при використанні математичної моделі визначають кінцеву швидкість v_j , час dt або шлях ds та витрату палива dg для кожного кроку інтегрування, виходячи з початкової швидкості v_0 .

Рівнодіюча сил R , що діють на поїзд, є адитивною силою, що складається з дотичної сили тяги

$$F_{\text{д}} = f(v, I_{\text{тед}}, \eta_{\Sigma}, u(x)), \quad (2.6)$$

гальмівних сил

$$B = f(v, u(x)), \quad (2.7)$$

та опору руху поїзда

$$W = f(v, x), \quad (2.8)$$

де u – управління локомотивом при відповідному режимі роботи (тяга, вибіг або гальмування);

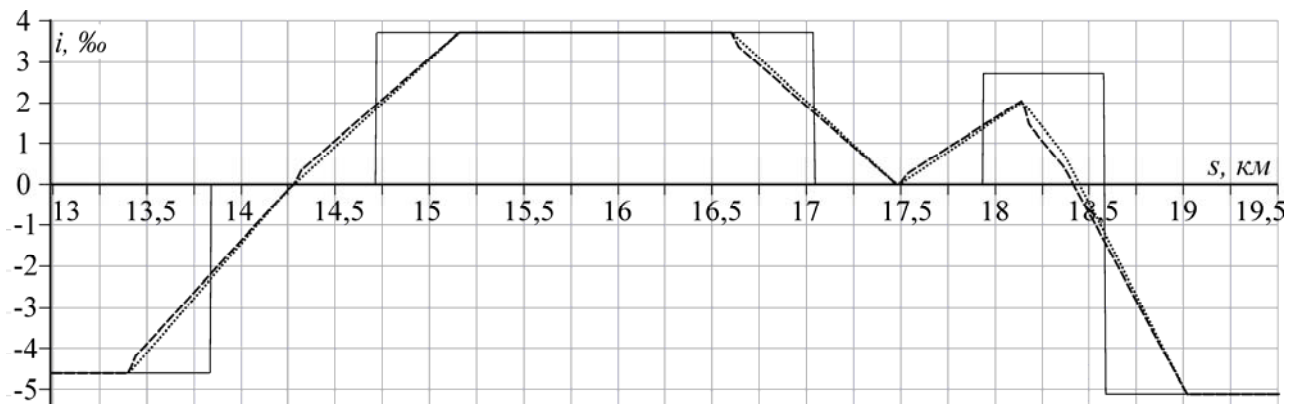
x – координата центру мас поїзда.

2.3 Потенціальна енергія руху поїзда

Потенціальну енергію руху поїзда створюють фактори навколишнього середовища – ухили профілю колії. Вони можуть як збільшувати так і зменшувати енергію поїзда. Тому при керуванні локомотивом необхідно якомога точніше враховувати вказаний фактор.

Для різних фізичних моделей поїзда можуть використовуватися різні інтерпретації профілю колії: для класичної моделі, у якій поїзд розглядається як матеріальна точка, – спрямлений профіль (рис. 2.1), для моделей дослідження динаміки поїзда – реальний профіль без спрямлення та ін.

Для моделі, яка розглядає поїзд у вигляді ланцюга з розподіленою масою, доцільно використовувати усереднення ухилів профілю колії по довжині поїзда з урахуванням розподілу маси складу та локомотива. Для цього виконується сплайн-інтерполяція ухилів по довжині ділянки:



————— — спрямлений профіль; — спрямлений профіль з врахуванням довжини поїзда; - - - - - — спрямлений профіль з врахуванням довжини та розподілу маси поїзда

Рисунок 2.1 – Профіль колії

$$i^c(s) = \begin{cases} 0; & s < 2000; \\ 0,5; & s < 5500; \\ -3; & s < 7500; \\ \dots & \\ -8,4; & s < 44000; \\ -3,2; & s < 44200; \\ -1; & otherwise. \end{cases} \quad (2.9)$$

Усереднення профілю колії по довжині поїзда визначається для певної координати розташування поїзда шляхом інтегрування функціональної залежності $i_1^c(s)$ у межах довжини поїзда $\left[x - \frac{l_{\Pi}}{2}, x + \frac{l_{\Pi}}{2} \right]$:

$$i_1^c = l_{\Pi}^{-1} \cdot \int_{x-l_{\Pi}/2}^{x+l_{\Pi}/2} i^d(s) \cdot ds, \quad (2.10)$$

де x – поточна координата встановлення середини поїзда.

Наявність у складі різнотипних вагонів, їх нерівномірне завантаження, порожні поїзди та інші фактори викликають нерівномірний розподіл маси по довжині поїзда. Це впливає на його потенціальну енергію. На рис. 2.2 наведено розподіл маси по довжині поїзда (поїзд з локомотивом серії 2ТЭ116 масою

$Q = 1454$ т та довжиною $l_{\Pi} = 871$ м).

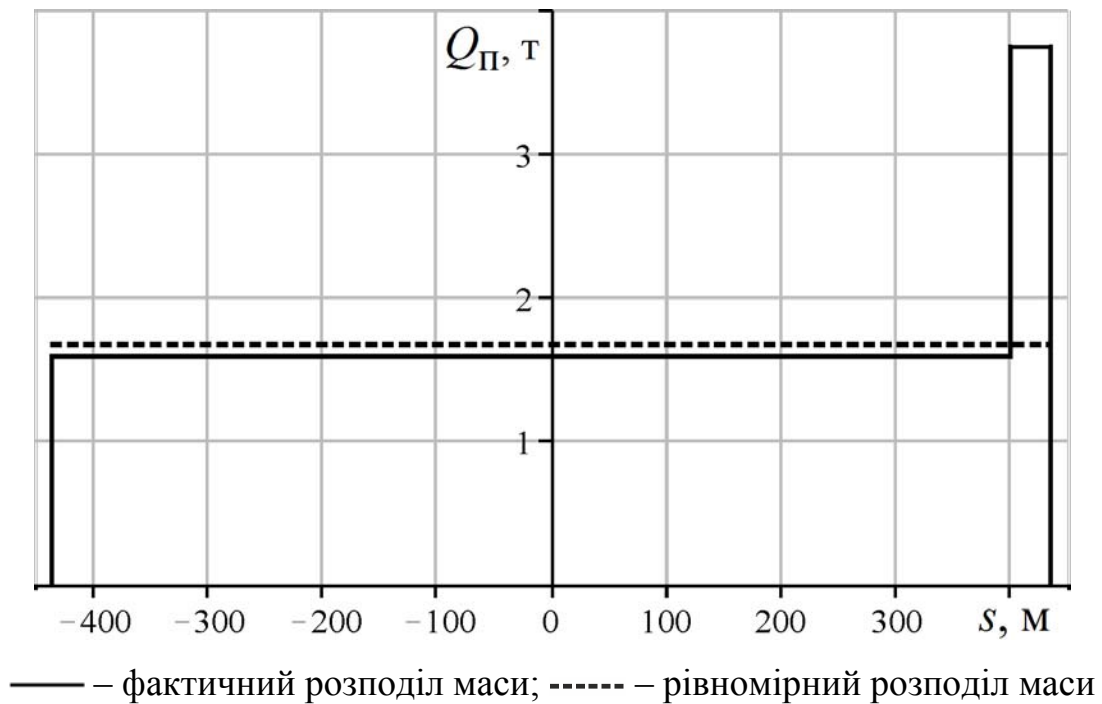


Рисунок 2.2 – Розподіл маси по довжині поїзда

Для вказаного поїзда аналітична залежність розподілу маси має вигляд

$$Q_p = \begin{cases} 1,58, & s \in [x - 435,6; x + 399,6]; \\ 3,75, & s \in (x + 399,6; x + 435,6]. \end{cases} \quad (2.11)$$

Профіль колії $i_{Q1}^c(s)$, усереднений по довжині поїзда l_{Π} та з врахуванням розподілу маси Q_p матиме вигляд

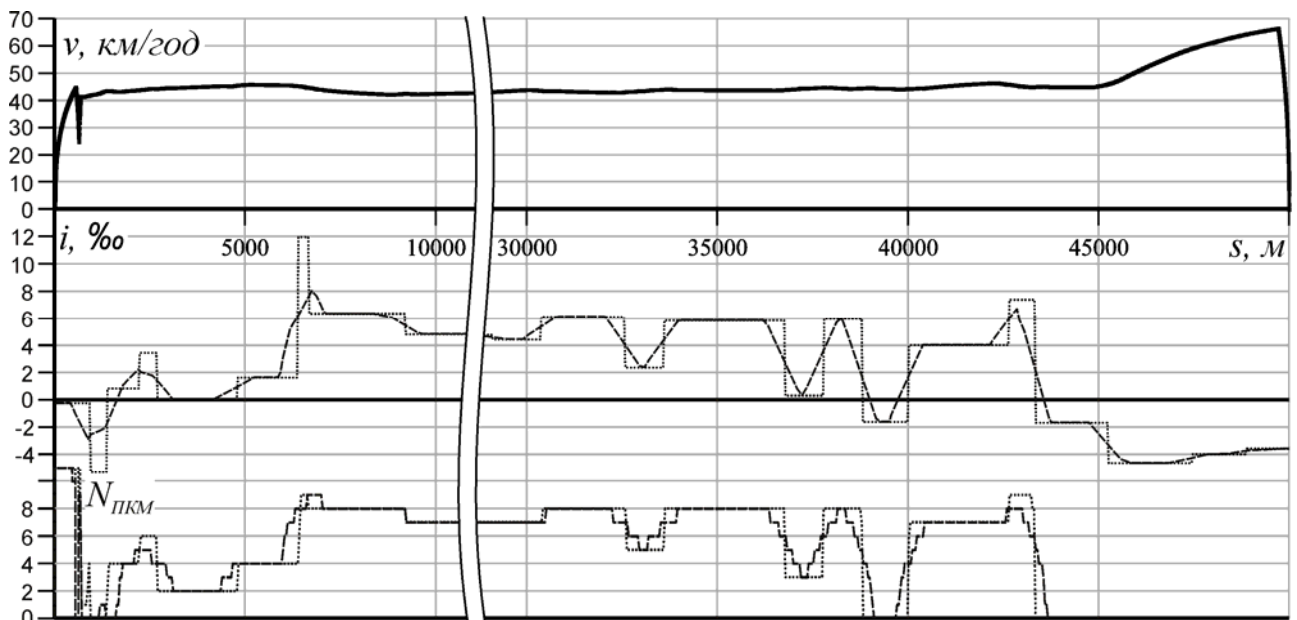
$$i_{Q1}^c = \frac{1}{l_{\Pi} \cdot Q} \cdot \int_{x-l_{\Pi}/2}^{x+l_{\Pi}/2} i^d(s) \cdot Q_p(s, x) \cdot ds. \quad (2.12)$$

Визначення потенціальної енергії поїзда за наведеним алгоритмом дозволяє більш точно враховувати сили, що діють на поїзд, та, у свою чергу, вибрати енергозощаджуючі режими керування. Порівняння результатів розрахунку енергозощаджуючих траєкторій руху поїзда по ділянці довжиною 50 км вищевказаним поїздом при фіксованому часі ходу 68 хв наведено в табл. 2.1 та на рис. 2.3.

Таблиця 2.1

Результати порівняння витрати енергоресурсів при фіксованому часі ходу

Тип профілю	Позначення	Витрата палива, кг
Спрямлений профіль	$i^c(s)$	315
Спрямлений профіль з урахуванням довжини поїзда	$i_1^c(s)$	314
Спрямлений профіль з урахуванням довжини та розподілу маси поїзда	$i_{Q1}^c(s)$	313



----- — для спрямленого профілю; - - - - - — для спрямленого профілю з урахуванням довжини та розподілу маси поїзда

Рисунок 2.3 – Траєкторія, профіль та керування

Зменшення витрати енергоресурсів складає [76]

$$\Delta q = \frac{q^c - q_{Q1}^c}{q^c} \cdot 100; \quad (2.13)$$

$$\Delta q = \frac{315 - 313}{315} \cdot 100 = 0,63 \%$$

Таким чином, можна стверджувати, що урахування потенціальної енергії поїзда, розрахованої шляхом спрямлення профілю колії з урахуванням довжини та розподілу маси поїзда, дозволяє зменшити витрату енергоресурсів до 0,6 % за рахунок поступового регулювання потужності локомотива та більш точного врахування сповільнюючих сил. До того ж, поступове регулювання потужності зменшує навантаження на всі елементи передачі потужності та «стрибки» струму ТЕД і генератора [77].

2.4 Інтегрування рівняння руху поїзда

Будь-яка задача, пов'язана з розрахунком потоків енергії чи руху тіл, в остаточному підсумку зводиться до розв'язання (інтегрування) диференціальних рівнянь. Тому числові методи розв'язання диференціальних рівнянь відіграють важливу роль у практиці інженерних розрахунків.

Розв'язання задачі, виконане за всіма правилами математики й механіки, може виявитися неприйнятним з позиції безпеки технології виробництва. Очевидно, проблема експлуатаційної надійності та оптимальності перевезень також є спільною для всіх методів розрахунків руху поїздів та повинна вирішуватися в тягових розрахунках. Зазначені вимоги та підходи полегшують розв'язання задачі та є основоположними для будь-якого з перерахованих методів розрахунку руху поїзда.

Якщо серед сил, які визначають рух системи, є хоча б одна, що залежить від швидкості, то розраховувати рух за допомогою загальних теорем класичної механіки не можна, тому що такі сили проявляються в процесі руху та, впливаючи на кінематичні характеристики руху, самі нелінійно залежать від них. Такі завдання можна вирішити тільки методом інтегрування диференціального рівняння руху.

Усі основні сили, що визначають рух поїзда, поставлені в залежність від швидкості. Крім того, на поїзд діють додаткові сили опору від ухилів та кривизни колії, які також впливають на швидкість руху поїзда, а ступінь впливу залежить від сполучень елементів профілю колії та їх протяжності.

Отже, для розрахунку руху поїзда необхідно прийняти метод інтегрування диференціального рівняння руху (2.5), перетворюючи його так, щоб знайти закон руху:

$$\frac{dv}{dt} \frac{ds}{ds} = \xi \cdot r, \quad (2.14)$$

де r – питома рівнодіюча сила.

У координатах $s - v$ рівняння (2.14) з урахуванням

$$ds = v \cdot dt \quad (2.15)$$

можна записати у вигляді

$$ds = \frac{v dv}{\xi \cdot r}. \quad (2.16)$$

Після інтегрування лівої та правої частин по відповідних змінних отримаємо

$$\int ds = \int \frac{v dv}{\xi \cdot r}. \quad (2.17)$$

З урахуванням (2.6), (2.7), (2.8) та (2.12) питому рівнодіючу силу можна визначити за формулою

$$r = \frac{F_{\text{д}}(v, I_{\text{тед}}(u), \eta_{\text{П}}) - B(v, u(x), l_{\text{П}}) - W(v)}{P + Q} - \tilde{i}(x). \quad (2.18)$$

До задачі Коші приводять розрахунки процесів, які підпорядковані певним закономірностям та задовольняють певні початкові умови, що характеризує стан об'єкта на початку процесу. Законом руху поїзда є функція $v(s)$, а стан поїзда як механічної системи в кожен момент часу визначається фазовими координатами (v_i, s_i) .

Для звичайного диференціального рівняння першого порядку початкова умова полягає в тому, що функція $v(s)$ повинна набути наперед заданих значень $v = v_0$ та $s = s_0$.

Швидкість на початку руху v_0 , координати поїзда на ділянці s_0 та рівнодіюча сила r в момент початку руху відомі. Однак розв'язок невизначеного інтеграла (2.17) можна знайти тільки в тому випадку, якщо підінтегральна функція $1/r$ лінійна або виражена через елементарні функції, що дозволяють взяти від них невизначений інтеграл. Поїзд є нелінійною системою. Наприклад, при змінній швидкості руху поїзда виникають нелінійні зв'язки між рівнодіючою сил та прискоренням поїзда. У той же час, поїзд є лінеаризуємою системою, у якої права частина рівняння (2.17) допускає лінеаризацію та завдяки цьому піддається диференціюванню [73].

Таким чином, на відміну від інтегрального числення, в якому аргумент вважається безперервним, у тягових розрахунках функція $v(s)$ визначається при дискретних значеннях аргументу. Таке допущення рівнозначно заміні нерівномірно сповільненого руху рівномірно сповільненим, що в межах малого інтервалу змінної інтегрування дає невелику похибку. Приймавши підінтегральну функцію $1/r$ постійною в межах малого інтервалу змінної інтегрування, виносимо її за знак інтеграла, і тоді розв'язання диференціального рівняння руху поїзда зводиться до обчислення визначеного інтеграла:

$$\int ds = \frac{1}{\xi \cdot r} \int v dv. \quad (2.19)$$

2.4.1 Розв'язання рівняння руху поїзда для тягових розрахунків

Оскільки рівняння руху поїзда в тяговому режимі доцільніше розв'язувати в координатах $s-v$, то рівняння (2.19) для задачі Коші можна записати у вигляді

$$\int_{s_{j-1}}^{s_j} ds = \int_{v_{j-1}}^{v_j} \frac{v dv}{\xi \cdot r}. \quad (2.20)$$

Для визначення величини прирощення швидкості з використанням

принципу малих відхилень [78] після узгодження одиниць виміру отримаємо

$$v_j = \sqrt{\frac{\Delta s \cdot \xi \cdot r}{500} + v_{j-1}^2}. \quad (2.21)$$

Рівнодіюча прискорювальна-сповільнювальних сил може набувати як додатних, так і від'ємних значень. Тому для визначення значення v_j доцільно скористатися функцією виділення дійсного числа \Re [79]

$$v_j = \Re \sqrt{\frac{\Delta s \cdot \xi \cdot r}{500} + v_{j-1}^2}. \quad (2.22)$$

При числовому розв'язанні рівняння (2.22) інтервал Δs задається у явному вигляді. Час ходу поїзда у хвилинах на відповідному відрізку знаходимо за формулою

$$\Delta t = \frac{60 \cdot 2 \cdot \Delta s}{1000 \cdot |v_j + v_{j-1}|}. \quad (2.23)$$

Отже, при відомих числових значеннях функції управління локомотивом $u(x)$ та профілю колії $\tilde{i}(x)$ за формулами (2.22) та (2.23) можна побудувати залежності $v = f(s)$ та $t = f(s)$.

2.4.2 Розв'язання рівняння руху поїзда при гальмівних розрахунках

Під час гальмування, з урахуванням того, що в міру зменшення швидкості v , гальмівні сили $b_T(v)$ зростають за рахунок коефіцієнта тертя колодок об колесо $\varphi_K(v)$, спостерігається збільшення прирощення швидкості по шляху $\frac{dv}{ds}$. Тому рівняння руху поїзда (2.14) доцільніше розв'язувати за змінними часу dt та швидкості dv [73]. Тоді рівняння руху поїзда набуває вигляду

$$\int_{t_{j-1}}^{t_j} dt = \int_{v_{j-1}}^{v_j} \frac{dv}{\xi \cdot r}. \quad (2.24)$$

Величину прирощення часу у хвилинах отримаємо з рівняння

$$t_j = 60 \cdot \frac{\Delta v}{\xi \cdot r} + t_{j-1}. \quad (2.25)$$

Пройдений шлях знаходимо за виразом

$$s_j = 8,33 \cdot (v_{j-1} + v_j)(t_j - t_{j-1}) + s_{j-1}. \quad (2.26)$$

Враховуючи те що під час рушання та розгону динаміка зміни кривої швидкості подібна кривій гальмування, цю методику доцільно використовувати у фазі розгону.

2.5 Визначення меж застосування та раціональних значень змінних інтегрування рівняння руху поїзда

Числові значення змінних інтегрування рівняння руху поїзда відіграють важливу роль при виконанні тягових розрахунків на ЕОМ. При збільшенні значення змінної інтегрування зменшується кількість ітерацій при визначенні траєкторій руху поїзда. Це призводить до підвищення швидкості обчислень. Проте, великі значення змінних інтегрування зменшують точність обчислень. Тому необхідно обрати значення змінних інтегрування, які будуть задовольняти високій швидкодій обчислень та точності розрахунків.

В [73] пропонується інтегрування рівняння руху поїзда наступним чином:

- при швидкості до 20 км/год інтегрувати по змінній часу t ;
- в інтервалі швидкостей від 20 км/год до максимально дозволеної – по змінній шляху s .

Величини кроку інтегрування часу t та шляху s обираються за умови прирощення швидкості $\Delta v \leq 3 \div 5$ км/год.

Вищевказана умова під час руху поїзда на рівномірній швидкості надає великих значень інтервалу Δs , а при інтенсивному розгоні – малих значень інтервалу часу Δt , що призводить до погіршення точності розрахунків.

Пропонуємо умовою вибору кроку змінних інтегрування обрати рівність відстаней між суміжними точками траєкторії руху поїзда в координатах $v-s$ (рис. 2.4).

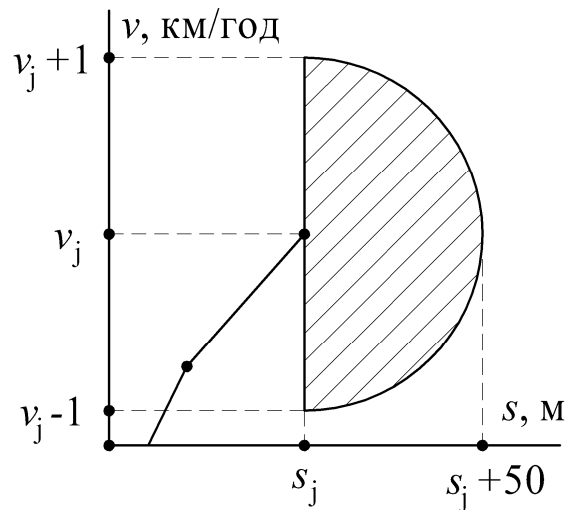


Рисунок 2.4 – Область допустимих значень кроку інтегрування рівняння руху поїзда

Дослідження показали, що достатня точність забезпечується при кроку інтегрування для шляху $\Delta s = 50$ м та швидкості $\Delta v = 1$ км/год.

При інтегруванні рівняння руху поїзда по змінним шляху s та швидкості v за формулою (2.22) крок інтегрування Δs_j в метрах поточної ітерації з врахуванням попередньої розраховується за формулою

$$\Delta s_j = 50 \sqrt{\left| 1 - (v_{j-2} - v_{j-2})^2 \right|}; \quad (2.27)$$

при інтегруванні по змінним швидкості s та часу t за формулою (2.25) крок інтегрування Δv_j в км/год розраховується за формулою

$$\Delta v_j = \sqrt{\left| 1 - \left(\frac{s_{j-2} - s_{j-1}}{50} \right)^2 \right|}. \quad (2.28)$$

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 вібрігу – інтегруванням по змінним шляху s та швидкості v ;

– в режимі гальмування – інтегруванням по швидкості v та часу t .

2.6 Перевірка точності та адекватності моделі

Перевірку точності та адекватності математичної моделі руху поїзда виконано за методами інтегрування: класичним, Рунге–Кутти–Фельберга, Розенброка. Приклад програми інтегрування рівняння руху поїзда наведено в дод. А. Результати розв'язання рівняння руху поїзда за вказаними методами інтегрування диференціальних рівнянь наведено в табл. 2.2 та на рис. 2.5.

Таблиця 2.2

Перевірка точності та адекватності математичної моделі руху поїзда

Метод	s , м	v , км/ГОД	t , хв
Класичний	$\frac{5500}{1,45}$	$\frac{90,12}{-0,04}$	$\frac{5,38}{-0,74}$
	$\frac{5503}{-0,83}$	$\frac{88,09}{0,02}$	$\frac{5,41}{-0,18}$
Розенброка	$\frac{5506}{1,45}$	$\frac{90,12}{0,07}$	$\frac{5,38}{-0,74}$
	$\frac{5502}{0,69^*}$	$\frac{88,83}{0,02^*}$	$\frac{5,49}{-0,55^*}$

Примітка: у чисельнику – абсолютне значення; в знаменнику – похибка;
* – середнє значення похибки, %

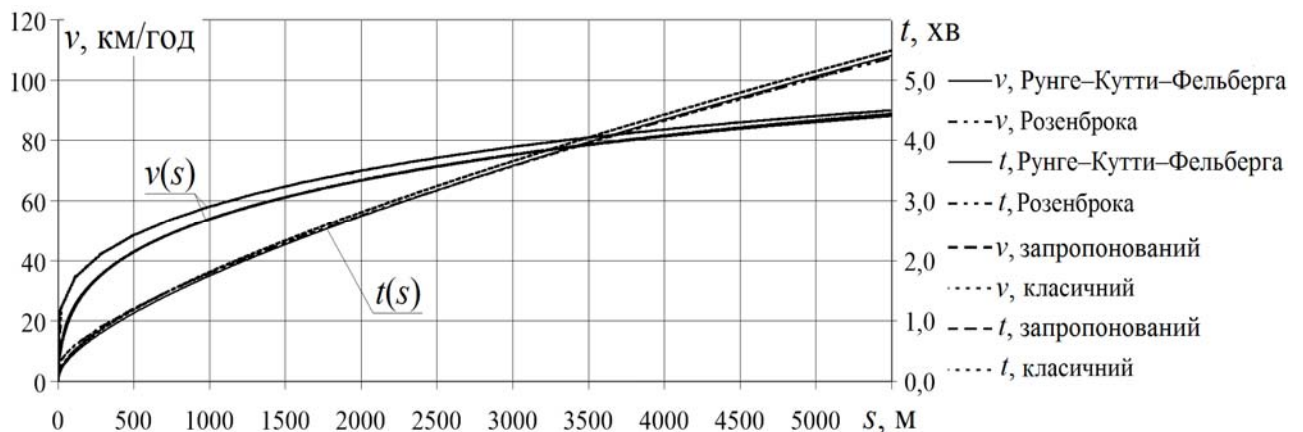


Рисунок 2.5 – Графічна інтерпретація перевірки точності та адекватності математичної моделі руху поїзда

З результатів перевірки можна стверджувати, що середнє значення похибки не перевищує 0,7 % для пройденого шляху, 0,02 % для швидкості та 0,55 % для часу ходу поїзда. Отже, прийнята модель може бути використана для визначення енергозаощаджуючих режимів ведення поїздів.

Висновки до розділу 2

1. Для відповідності своєму призначенню та забезпечення практичної корисності проаналізовано та виділено основні вимоги до математичної моделі руху поїзда. Обрано стахостичну динамічну математичну модель неперервного типу, що дає змогу ймовірнісного врахування змінних факторів, які діють на поїзд, з урахуванням перехідних процесів.

2. Для розмежування керованих та некерованих сил, які діють на поїзд як систему з високою інерційністю, проаналізовано та виділено основні складові руху поїзда – кінетичну та потенціальну енергію, що дозволяє уніфікувати енергозаощаджуючі режими ведення й підвищити точність та адекватність математичної моделі.

3. Для підвищення точності при визначенні потенційної енергії, фізична модель поїзда розглядається як ланцюг твердих жорстко зв'язаних тіл з урахуванням розподілу маси по довжині поїзда, що дозволяє враховувати зміну сил, викликаних ламаним профілем колії з інтервалом шляху, який відповідає довжині одиниці рухомого складу.

4. Проаналізовано вплив інтервалу змінних інтегрування рівняння руху поїзда на точність та економічність математичної моделі. Точність в межах інженерної похибки забезпечується при кроку інтегрування для шляху 50 м та швидкості 1 км/год. Це дозволяє використовувати математичну модель в бортових системах локомотива для оперативного перерахунку раціональних режимів керування при зміні поїзної ситуації.

5. Для підвищення економічності математичної моделі без втрати точності обчислень запропоновано умовою вибору кроку змінних інтегрування рівняння руху поїзда обрати рівність відстаней між суміжними точками

траєкторії руху в координатах шлях – швидкість. Розв’язання рівняння руху поїзда виконано за окремими змінними інтегрування для різних швидкісних режимів та фаз руху поїзда. Це підвищує достовірність результатів розрахунків на перехідних процесах.

6. Перевірено точність та адекватність математичної моделі в окремих режимах руху поїзда шляхом порівняння результатів з відомими методами числового інтегрування диференціальних рівнянь. Середнє значення узагальненої похибки складає 0,42 %.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЗАОЩАДЖУЮЧИХ РЕЖИМІВ ВЕДЕННЯ ПОЇЗДІВ

3.1 Вибір критеріїв оптимальності

Критерієм оптимальності називають показник, числове значення якого визначає гранично досяжну міру ефективності процесу [73]. Існує декілька методів, що дозволяють змоделювати рух поїздів відповідно до певних критеріїв оцінки ефективності [68]. Основним завданням постановки задачі оптимізації є формулювання цільової функції. Усі вихідні параметри є функціональними залежностями внутрішніх параметрів та процесів і, отже, не можуть змінюватися незалежно один від одного. Серед них завжди є такі параметри, поліпшення одного з яких призводить до погіршення іншого. Ці параметри називаються конфліктними.

Якщо серед вихідних параметрів можна виділити один, який найбільш повно характеризує властивості об'єкта, то його доцільно прийняти за цільову функцію, що є окремим критерієм. У більшості окремих критеріїв як цільову функцію приймають один з вихідних параметрів, а всі інші вихідні параметри відносять до обмежень. Однак у більшості випадків віддати перевагу одній серед якісно різнорідних величин досить важко, тому вдаються до побудови комплексного критерію, при якому цільова функція об'єднує всі або декілька вихідних параметрів. До комплексних критеріїв належать такі.

Мультиплікативні критерії можуть застосовуватися в тих випадках, коли для об'єкта відсутні умови працездатності типу рівностей й вихідні параметри не можуть набувати нульових значень. У цьому випадку цільова функція, яка підлягає максимізації, має вигляд:

$$f(x) = \frac{\prod_{j=1}^g y_j^+(x)}{\prod_{i=j+1}^m y_j^-(x)}, \quad (3.1)$$

де $y_j^+(x)$ – обмеження, за яких виконується максимальне збільшення функції;
 $y_j^-(x)$ – обмеження, за яких виконується мінімізація функції.

В адитивних критеріях цільова функція утворюється шляхом додавання вихідних параметрів, що перетворюються до безрозмірних складових. Це здійснюється за допомогою введення вагових коефіцієнтів. У випадку коли параметри мають різну фізичну розмірність, виконують нормування. Для адитивних критеріїв цільова функція має вигляд

$$f(x) = \sum_{j=1}^m \omega_j y_j(x), \quad (3.2)$$

де ω_j – ваговий коефіцієнт.

У випадку коли за мету поставлена задача отримання максимальної ймовірності P виконання умов працездатності, використовують статистичні критерії, при чому ймовірність i є цільовою функцією.

Якщо задача полягає в пошуку максимального або мінімального значення функції z_j , яка залежить від параметрів $\{y_j\}$, то застосовують відповідно максимальні (мінімальні) критерії. Для кількісної оцінки ступеня впливу j -ї умови розрахунок за відповідним вихідним параметром можна виконати за формулою

$$z_j = \omega_j \left(\frac{t_j - y_j^{\text{НОМ}}}{\delta_j} - 1 \right), \quad (3.3)$$

де $y_j^{\text{НОМ}}$ – номінальне значення вихідного параметра;

δ_j – величина, що характеризує розкид значень вихідного параметра.

Для визначення значення функції z_j за мінімального значення параметра y_j функція пошуку матиме вигляд

$$f(x) = \min^{z_j}(x), \quad 1 \leq j \leq \bar{j}, \quad (3.4)$$

де \bar{j} – максимальне значення варіантів зміни параметра y .

Стратегія пошуку значення x , яке має максимізувати функцію z_j за мінімального значення y_j , буде мати вигляд

$$\max f(x) = \max \min^{z_j}(x), 1 \leq j \leq \bar{j}. \quad (3.5)$$

Необхідно вказати, що x має належати певній області допустимих значень u : $x \in u$.

При розгляді діапазонів дослідження розрізняють методи локальної та глобальної оптимізації, які можуть не збігатися. Залежно від кількості керованих параметрів цільової функції розрізняють методи одновимірного та багатовимірного пошуку [80].

Оптимальне керування рухом поїзда передбачає застосування певної послідовності режимів керування та певної характеристики відповідного режиму, яка забезпечує мінімізацію (максимізацію) критерію оптимальності за умови виконання всіх обмежень, які накладаються на параметри руху поїзда.

Критерієм оптимальності є кількісний показник, який характеризує прийняте рішення. За критерій оптимальності можна прийняти витрати енергоресурсів, час ходу поїзда, виконану роботу, сили опору руху, температуру перегріву ТЕД та ін. Вказані критерії мають складові, що залежать від обраних режимів ведення поїзда, до того ж критерії пов'язані між собою функціональними залежностями [39]. Тому необхідно обрати два найбільш вагомих критерії, які охоплюють найбільшу кількість складових параметрів [81, 82].

У цьому випадку за критерії оптимальності обираємо витрату енергоресурсів на тягу g та час ходу поїзда t .

Витрата енергоресурсів на тягу поїздів є показником, який найбільшою мірою характеризує вартість перевізної роботи, у т.ч. економічність обраного режиму керування локомотивом. Повна витрата енергоресурсів під час руху поїзда по перегону складається з витрат енергоресурсів на такі складові:

- подолання сил основного опору руху;
- подолання сил додаткового опору руху;
- власні потреби;
- втрати при пуску;
- втрати в ТЕД та перетворювальних установках;
- втрати в автогальмах.

Час ходу поїзда враховує більшість фізичних факторів рухомого складу та параметрів його руху, а саме:

- довжину ділянки та поздовжній профіль;
- технічну та ділянкову швидкість;
- потужність локомотива, у т.ч. дизеля;
- температуру перегріву ТЕД та ін.

До того ж час ходу поїзда є обмежувальним фактором при розв'язанні рівняння руху поїзда, оскільки він має відповідати графіку руху.

Враховуючи вищевикладене, умова раціональності режиму має вигляд

$$\begin{bmatrix} g(u,s) \\ t(v(s)) \end{bmatrix} \rightarrow \min, \quad (3.6)$$

а за цільову функцію приймаємо вираз

$$k \left(\frac{g(u,s)}{t(v(s))} \right) \rightarrow \text{opt}, \quad (3.7)$$

де k – ваговий коефіцієнт.

Таким чином, на підставі вищевикладеного за критерії оптимальності обираємо витрату енергоресурсів та час ходу поїзда. Оптимізацію вказаних кількісних показників виконуємо за комплексним адитивним критерієм мінімізації; за діапазонами дослідження – використовуємо локальну оптимізацію; за кількістю керованих параметрів цільової функції обираємо методи багатовимірною пошуку.

3.2 Математичне моделювання техніко-економічних характеристик

ЛОКОМОТИВА

Прикладні задачі в разі використання для їх розв'язання ЕОМ насамперед повинні бути представлені в формальною математичною мовою, тобто для реального об'єкта, процесу або системи повинні бути побудовані їх математичні характеристики, які в кількісній формі за допомогою логіко-математичних конструкцій описують їх основні властивості, параметри, внутрішні та зовнішні зв'язки. Класичним прикладом представлення в математичній моделі деякого об'єкта в цифровій формі є опис його властивостей наборами $\{Y_k\}$ чисел та алгоритмами їх інтерпретації.

Важливою умовою правильного моделювання й, відповідно, успішного аналізу є попередня підготовка даних, яка включає різні перетворення вихідних значень. Найпростішими перетвореннями є інтерполяція та сплайн-інтерполяція [83, 84].

Використання великої кількості вузлів інтерполяції на відрізку $[a, b]$ часто призводить до поганого наближення через накопичення похибок у процесі обчислень [85]. Крім того, через розбіжності процесу інтерполяції збільшення кількості вузлів не обов'язково приводить до підвищення точності. Для зниження похибок весь відрізок $[a, b]$ розбивається на окремі відрізки й на кожному з них функцію замінюють наближено поліномом невисокого ступеня. Це називається кусково-поліноміальною інтерполяцією.

Одним із способів інтерполяції на всьому відрізку $[a, b]$ є інтерполювання сплайнами. Сплайном називається кусково-поліноміальна функція

$$y_i = f(x_i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (3.8)$$

яка визначена на відрізку $[a, b]$

$$a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{n-1} < x_n = b \quad (3.9)$$

і має на цьому відрізку деяку кількість безперервних похідних (рис. 3.1). Переваги інтерполяції сплайнами порівняно зі звичайними методами інтерполяції – у збіжності та стійкості обчислювального процесу.

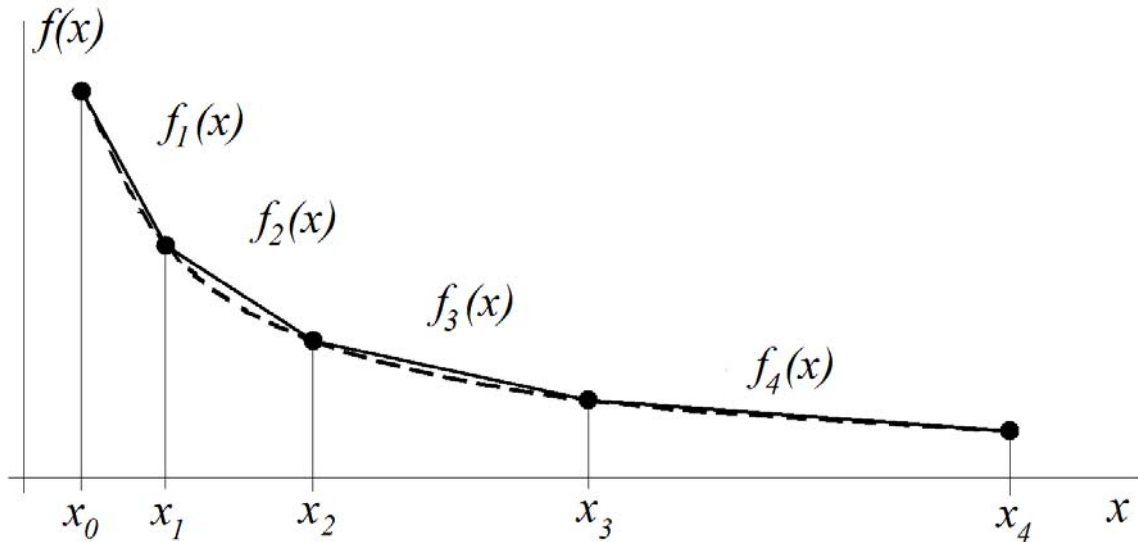


Рисунок 3.1 – Інтерполяція дискретних значень лінійним та нелінійним сплайнами

Нелінійність систем ускладнює розрахунки. Для нелінійних рівнянь немає загальної теорії розв'язків, і в кожному окремому випадку використовуються ті чи інші прийоми наближених розв'язків. З огляду на це системи поділяють на лінеаризуючі та нелінеаризуючі (істотно нелінійні).

Лінеаризуючими називають системи, у яких права частина рівняння допускає лінеаризацію й завдяки цьому піддається диференціюванню.

Характеристики сил тяги, гальмування й опору руху можуть бути лінеаризовані, якщо використовувати принцип малих відхилень. Його суть полягає в тому, що процес руху розглядається в межах послідовного ряду малих інтервалів аргументу та відхилення змінних стану системи від сталих значень залишається весь час достатньо малим [86]. Такий принцип дозволяє приблизно вважати рівнодіючу сил поїзда постійною в межах кожного малого інтервалу швидкості.

Лінеаризацію змінних можна виконати графічним шляхом або розкладанням функції в ряд Тейлора. Графічний метод лінеаризації називають

кусково-лінійною апроксимацією (наближенням) нелінійних характеристик. При виконанні лінеаризації необхідно дотримуватися встановлених правил.

Лінеаризація допустима, якщо характеристики $y = f(x)$ є «гладкими» (не мають розривних неоднозначностей або кривих, що різко згинаються). Проте якщо подивитися на тягові характеристики, то легко виявити переломи кривих у точках обмежень сили тяги по зчепленню коліс з рейками та струму, які є неоднозначними при одних і тих самих значеннях швидкості. Розриви кривих відбуваються при зміні режимів роботи тепловоза.

Відомо, що можна проводити лінеаризацію тільки спрямлених кривих. З курсу математики відомо: якщо координати точок кривої є результатом розв'язання функції, що безперервно диференціюється, то крива називається спрямлюючою. Правилами тягових розрахунків встановлені характеристики спрямлених кривих в межах однорідних функцій. При перехідних режимах локомотивів сила тяги має різні значення при одній і тій самій швидкості. Для спрощення розрахунків руху поїзда ПТР допускають враховувати середню арифметичну цих сил.

Для тепловоза базовими для математичної моделі є такі характеристики та значення:

- частота обертання колінчастого вала дизеля, яка залежить від позиції контролера машиніста $n_{\text{КВ}} = f(N_{\text{ПКМ}})$;

- потужність дизеля $N_e = f(n_{\text{КВ}})$ або $N_e = f(N_{\text{ПКМ}})$;

- обмеження сили тяги по зчепленню коліс з рейками $F_{\text{зч}} = f(v)$;

- електротягові характеристики колісно-моторних блоків ТРС $F_{\text{д}} = f(I_{\text{тед}})$, $v = f(I_{\text{тед}})$;

- характеристики витрати палива дизелем $g = f(N_e)$;

- ККД електричних машин, апаратів, перетворювачів та механічного устаткування;

- теплові характеристики тягових електричних машин $\tau = f(I_{\text{тед}})$,

$$T = f(I_{\text{тед}});$$

– значення маси локомотива P , розрахункової швидкості $v_{\text{розр}}$ та сили тяги $F_{\text{розр}}$, конструкційної швидкості v_K та питомого прискорення поїзда ξ .

Оскільки вихідні характеристики задані дискретними значеннями, то виконуємо сплайн-інтерполяцію лінійним сплайном, наприклад сплайн потужності дизеля

$$N_e = \text{spline}(\{PKM\}, \{N_{\text{diz}}\}, N_{\text{ПКМ}}, \text{linear});$$

$$N_e = \begin{cases} 146 \times N_{\text{ПКМ}}, N_{\text{ПКМ}} < 1; \\ 64 + 82 \times N_{\text{ПКМ}}, N_{\text{ПКМ}} < 2; \\ \dots \\ -900 + 210 \times N_{\text{ПКМ}}, N_{\text{ПКМ}} < 14; \\ -900 + 210 \times N_{\text{ПКМ}}, \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.10)$$

Отже, результатом є функціональні залежності основних техніко-економічних характеристик локомотива.

Дотична сила тяги локомотива створюється шляхом перетворення декількох видів енергії. Кожен елемент тягової передачі локомотива має певні обмеження, а саме: дизель обмежений потужністю, генератор – струмом та напругою та ін. Тягова характеристика тепловоза має обмеження сили тяги та швидкості. Оскільки визначення сили тяги локомотива за (2.18) передбачає наявність відомих поточних значень швидкості та функції управління локомотивом, то розв'язання рівняння руху поїзда починається з визначення позиції керування, за якою у свою чергу встановлюється частота обертання колінчастого вала дизеля згідно з табл. 3.1.

Оскільки потужність силової установки залежить від частоти обертання колінчастого вала, то ефективну потужність визначаємо з графіка $N_e = f(n_{\text{КВ}})$ (рис. 3.2) з використанням [88]. Дослідження проведені в [89, 90] показали й інші способи визначення потужності дизеля, в т.ч. й непрямі, які володіють достатньою точністю, але цей є найбільш доцільним для експлуатаційних умов.

Таблиця 3.1

Відповідність позиції контролера машиніста та частоти обертання колінчастого вала дизеля [87]

$N_{\text{ПКМ}}$	$n_{\text{КВ}}, \text{ХВ}^{-1}$	$N_{\text{ПКМ}}$	$n_{\text{КВ}}, \text{ХВ}^{-1}$
0	350 ± 20	8	675 ± 20
1	350 ± 20	9	720 ± 20
2	395 ± 20	10	770 ± 20
3	445 ± 20	11	815 ± 20
4	490 ± 20	12	860 ± 20
5	535 ± 20	13	910 ± 20
6	580 ± 20	14	955 ± 20
7	630 ± 20	15	1000 ± 10

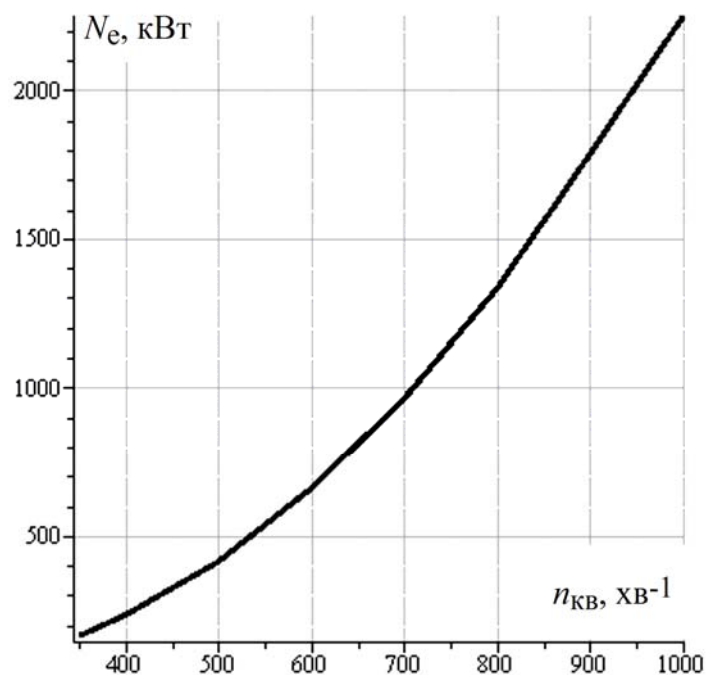


Рисунок 3.2 – Залежність ефективної потужності дизеля типу 1А-5Д49 від частоти обертання колінчастого вала

Дотичну потужність локомотива можна визначити з ефективної потужності дизельного двигуна з урахуванням ККД усіх послідовних ланок

передачі: головного генератора, випрямної установки, тягових електродвигунів, механічних частин (тягові редуктори, моторно-осьові підшипники [91]).

Коефіцієнт корисної дії генератора типу ГС-501 становить у межах 95-96 %. Але для визначення енергозощаджуючих режимів необхідно використовувати функцію $\eta_{\Gamma} = f(I_{\Gamma})$, яка залежить від напруги генератора, співвідношення активного та реактивного навантаження $\cos(\varphi)$ та інших параметрів. Тому наводимо характеристику ККД генератора типу ГС-501 (рис. 3.3) [92]. Моделювання роботи тягового генератора виконуємо з використанням [93].

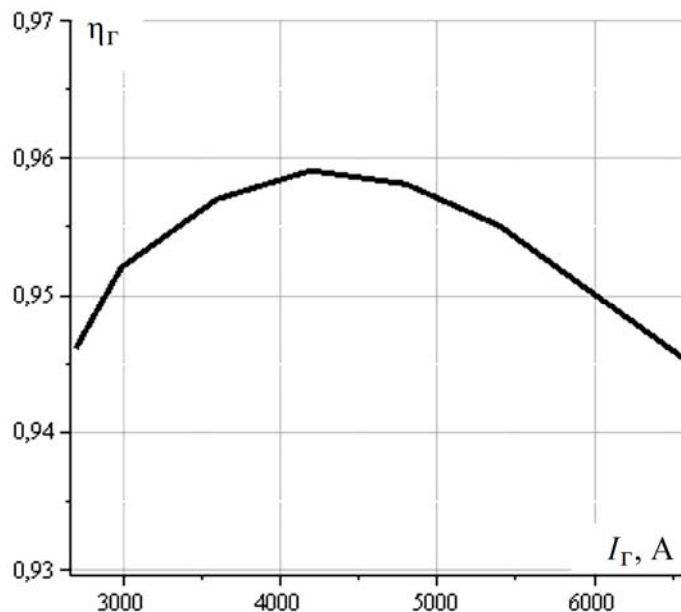


Рисунок 3.3 – Залежність ККД генератора типу ГС-501 від струму

Основними параметрами, що характеризують випрямні установки, є: максимальний прямий струм; спад напруги на діодах при заданому значенні прямого струму; максимально допустима зворотна напруга; зворотний струм при заданій зворотній напрузі; робочий діапазон температур [94].

Коефіцієнт корисної дії випрямної установки залежить від потужності, що передається, та потужності, що розсіюється. Потужність, що розсіюється, визначається спадом напруги на діодах, які включені послідовно в електричне коло, та струмом, що протікає через діоди. Спад напруги на конкретному типі діода є сталою величиною. Тяговий струм залежить від режиму роботи

локомотива. Отже, характеристика зміни ККД випрямної установки напряму залежність від струму. Для тепловоза серії 2ТЭ116 вона наведена на рис. 2.8.

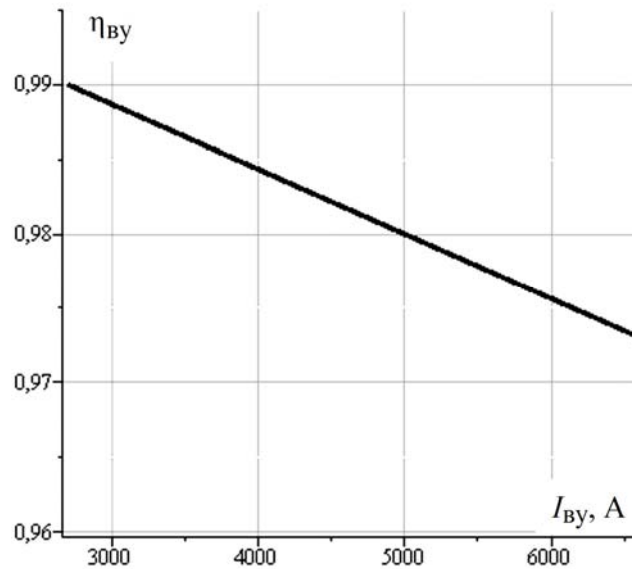


Рисунок 2.8 – Характеристика ККД випрямної установки тепловоза серії 2ТЭ116

Струм тягових електричних машин є величиною обмеженою електричними, механічними та тепловими факторами, а також пусковими характеристиками локомотива. Допустимі значення струму $\bar{I}_{тед}$, що приведені до тягового електродвигуна тепловоза серії 2ТЭ116, наведені на рис. 2.9.

Для тягових електродвигунів локомотивів характер зміни ККД є нелінійним. Залежність $\eta_{тед}$ задається електромеханічними характеристиками, тому згідно з [95] наводимо її на рис. 2.10.

Значення ККД механічних частин меншою мірою залежить від навантаження, тому для розрахунків приймаємо його значення сталою величиною $\eta_{мех} = 0,89$ [87].

Для перевірки моделі використаємо коефіцієнт детермінації R^2 , який набуває значень в діапазоні від нуля до одиниці $0 \leq R^2 \leq 1$. Він показує, яка частина дисперсії результативної ознаки пояснена рівнянням регресії. Чим більше значення R^2 , тим більша частина результативної ознаки пояснюється рівнянням і тим краще рівняння описує вихідні дані.

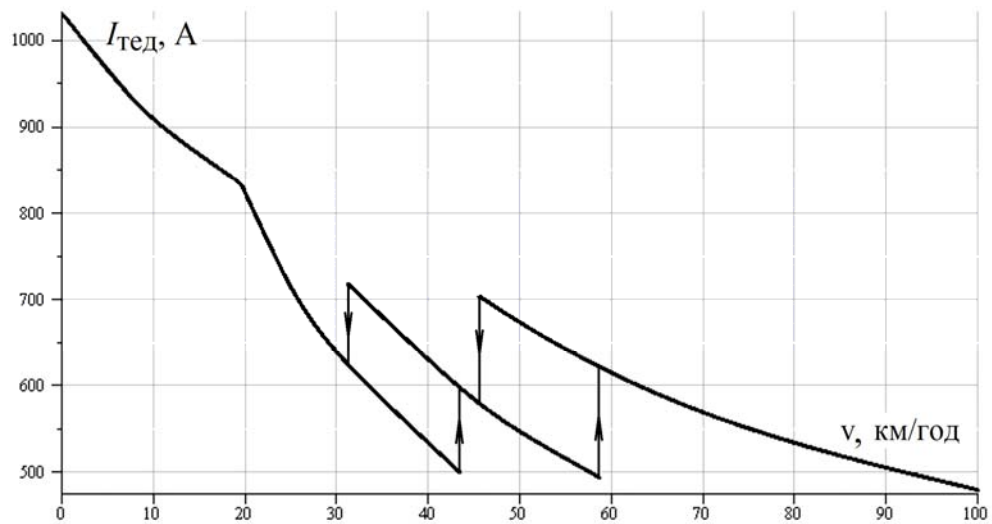


Рисунок 2.9 – Струм $\bar{I}_{тед}$ тепловоза серії 2ТЭ116

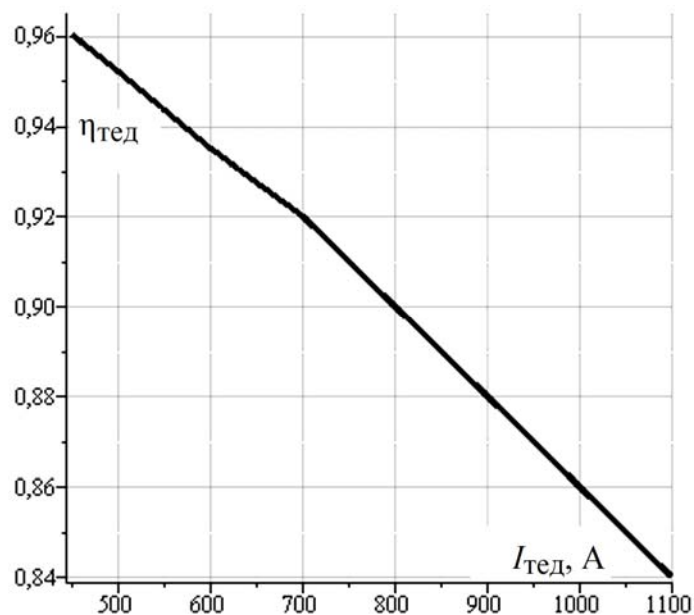


Рисунок 2.10 – Характеристика ККД тягових електродвигунів типу ЭД-118

При перевірці достовірності розрахункової тягової характеристики локомотива серії 2ТЭ116 на підставі того, що потужність

$$N = \frac{F \cdot v}{3,6} \quad (3.11)$$

та ККД передачі від дизеля до колісних пар

$$\eta_{\Pi} = \eta_{ген} \cdot \eta_{ву} \cdot \eta_{тед} \cdot \eta_{мех} , \quad (3.12)$$

з тяговою характеристикою [66] за критерієм детермінації [95, 96] в діапазоні

швидкостей $20 \div 70$ км/год значення $R^2 = 0,99$, що свідчить про можливість застосування наведеного алгоритму для визначення сили тяги.

Питомою витратою палива g_e називають витрату палива за одиницю часу, що віднесена до одиниці ефективної потужності дизеля. Чим менше значення g_e , тим вищий ефективний коефіцієнт корисної дії дизеля, що являє собою відношення кількості теплоти, перетвореної в корисну роботу на колінчастому валі, до кількості теплоти, підведеної для виконання цієї роботи. Цей показник враховує всі втрати – як механічні, так і теплові.

Для дизеля тепловоза типу 1А-5Д49 потужністю 2250 кВт залежність питомої витрати палива від навантаження наведена на рис. 2.11.

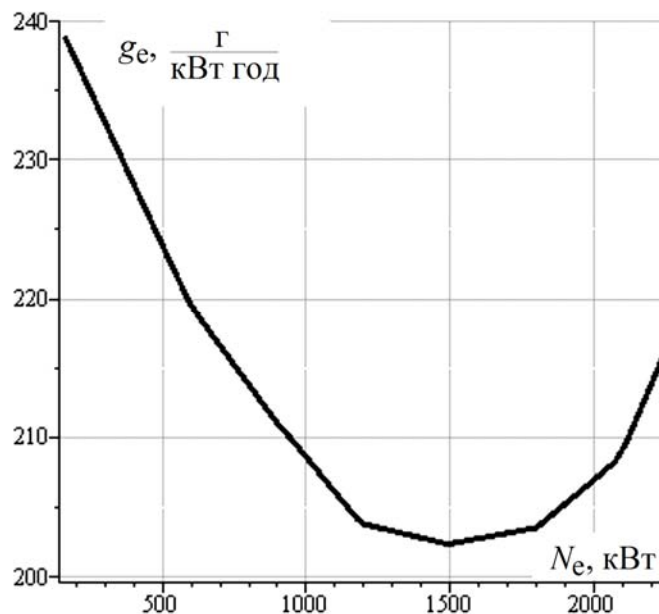


Рисунок 2.11 – Питома витрата палива дизеля типу 1А-5Д49 [97]

Зв'язок питомої витрати палива з керуючим впливом (позицією контролера машиніста) відбувається з використанням табл. 3.1 та рис. 3.2.

3.3 Визначення енергозощаджуючих режимів керування локомотивом

Тягові розрахунки з визначенням енергозощаджуючих траєкторій передбачають пошук раціональної залежності витрат енергоресурсів з часом ходу поїзда. При виборі енергозощаджуючих траєкторій руху поїзда та при розробці режимних карт ведення поїздів необхідно враховувати змінні

параметри, такі як профіль ділянки, масу складу, серію локомотива та ін. [98]. При зростанні швидкості руху відбувається збільшення опору, який пропорційний квадрату швидкості, що призводить до підвищення витрат паливо-енергетичних ресурсів. Навпаки, зниження витрат через зменшення швидкості руху призводить до збільшення часу ходу поїзда, який має бути узгодженим з графіком руху та іншими техніко-економічними параметрами, залежними від швидкості руху [99]. Розглянемо параметри, які впливають на залежність витрат енергоресурсів з часом ходу поїзда на окремих фазах руху поїзда.

Режим ведення поїзда складається з таких фаз:

- пуск локомотива та розгін поїзда до виходу на обрану характеристику локомотива;
- рух при увімкнених тягових електродвигунах;
- рух на вибігу при вимкнених тягових двигунах;
- регульовальне гальмування-пригальмовування поїзда на спусках для підтримки його швидкості на заданому рівні;
- гальмування для зниження швидкості перед сигналами та зупинками.

Кожна з цих фаз істотно впливає на результати використання потужності локомотивів та витрати паливо-енергетичних ресурсів на тягу поїздів.

Додаткові динамічні навантаження виникають як у тяговому режимі, так і під час руху на вибігу, а також у гальмівному режимі та в процесі відпускання гальм. Виникаючі сили можуть досягати найбільшого значення в різних частинах складу залежно від однорідності вагонів та ступеня їх завантаження, а також від того, стиснений склад чи розтягнутий. У вантажних поїздах ці сили можуть призводити до обриву складу або видавлювання вагонів, у пасажирських та приміських – до порушення комфорту пасажирів.

Значення динамічних сил залежать від маси та довжини поїзда, профілю колії, режимів тяги та гальмування, швидкості руху, зазорів у автозчепних пристроях, швидкості поширення гальмівної хвилі по довжині поїзда, типу й стану гальмівних пристроїв [100, 101, 102, 103].

3.2.1 Визначення енергозаощаджуючих режимів керування при розгоні поїзда

Для оцінки ефективності режимів рушання та розгону виконано розрахунок багатоваріантних траєкторій розгону поїзда з варіативними вихідними даними та оптимізацією їх за двома параметрами – витратою енергоресурсів g та часом ходу поїзда t .

Розгін може відбуватися по великій кількості траєкторій при різних параметрах (ухил, маса складу, потужність локомотива та ін.).

Для можливості порівняння задаємо варіанти вихідних даних:

- локомотив тепловоз серії 2ТЭ116;
- маса складу 1000, 1500, ... , 3000 т;
- ухил -3‰, -1,5‰, ... , 3‰.

У результаті має бути побудована крива швидкості при кожній варіації вихідних даних, яка проходить через точку з фазовими координатами $v = 50$ км/год та $s = 3000$ м. При цьому визначається відповідна витрата палива та час ходу поїзда. Алгоритм визначення енергозаощаджуючих режимів передбачає знаходження витрати палива та часу ходу поїзда за блок-схемою (рис. 3.4) [104, 105, 106].

Розрахунок багатоваріантних режимів ведення поїзда дозволяє отримати результати, які зводимо до табл. Б.1, Б.2 дод. Б.

Для обробки та узагальнення результатів вводимо коефіцієнт питомої витрати палива при розгоні $k_p(u, i)$. Фізичний зміст – витрата палива за одну хвилину, що припадає на одну тонну маси складу при певній потужності силової установки.

$$k_p(u, i) = \frac{1000 \cdot g(s)}{Q \cdot t(s)}. \quad (3.13)$$

Цільова функція локальної оптимізації для фази рушання та розгону

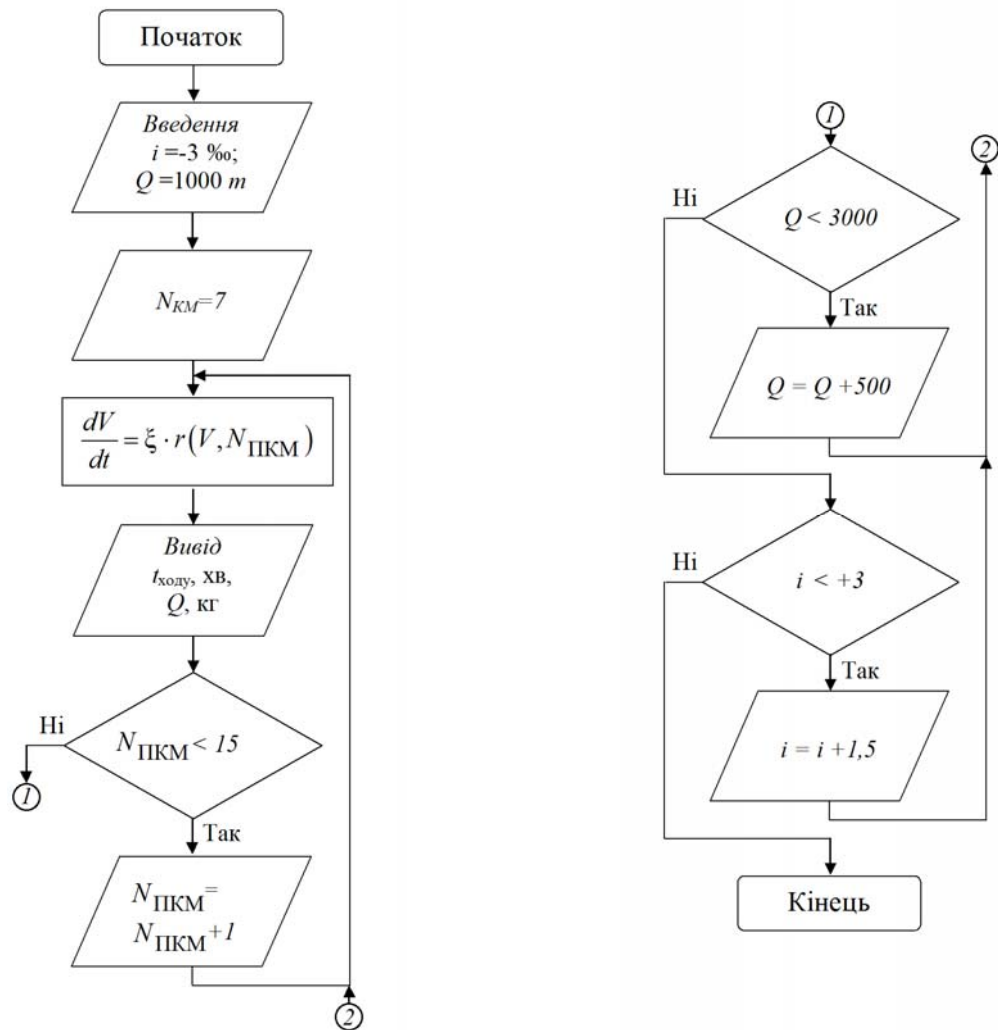


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму визначення витрати палива та часу ходу поїзда

$$k_p^{\Pi}(u, i) = \frac{d^2 k_p(u, i)}{du^2} \rightarrow \max. \quad (3.14)$$

Розраховуємо коефіцієнт питомої витрати палива при розгоні $k_p(u, i)$ для заданих значень ухилів та позицій контролера машиніста. Для прикладу на рис. 3.5 наводимо значення коефіцієнта $k_p(u, i)$ для ухилу $i = -1,5 ‰$ та $Q = 3000$ т.

Рациональні значення коефіцієнта питомої витрати палива при розгоні знаходимо шляхом визначення точки максимальної кривизни кривої [107]. Для цього будуємо дотичні до кривої в точках з цілим значенням абсциси – позиції

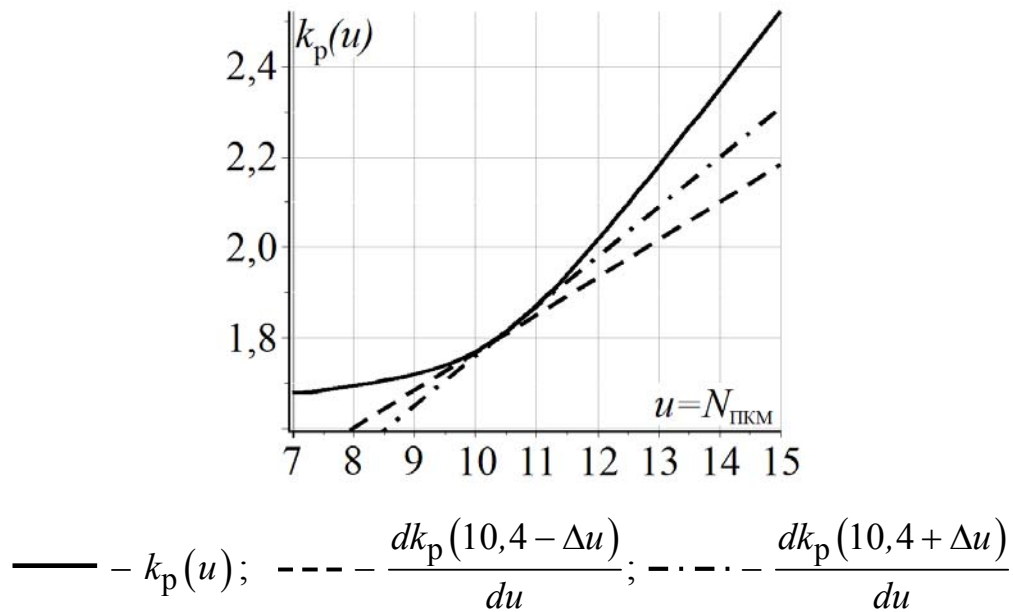


Рисунок 3.5 – Графічна інтерпретація визначення $u^{\text{рац}}$
для $i = -1,5 \text{ ‰}$ та $Q = 3000 \text{ т}$

контролера машиніста. Знаходимо найбільший кут між дотичними – найбільше значення другої похідної в інтервалі $u \pm \Delta u$. Графічна інтерпретація наведена на рис. 3.6.

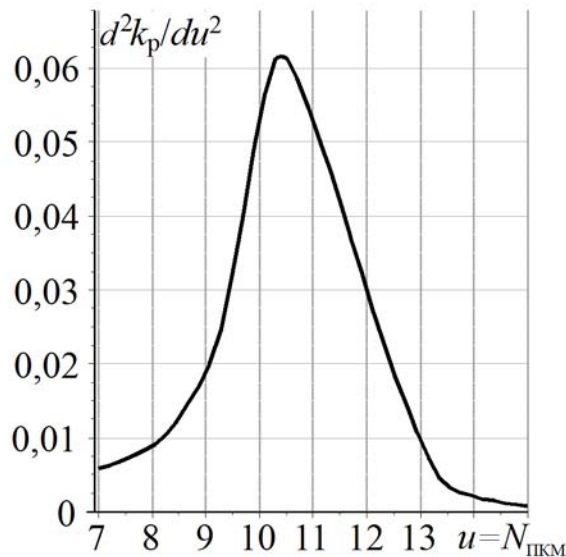


Рисунок 3.6 – Залежність $k_p^{\text{II}}(u)$, $i = -1,5 \text{ ‰}$ та $Q = 3000 \text{ т}$

Аналогічним чином визначаємо характерні точки для інших ухилів. Точки раціональних режимів з'єднуємо кривою (рис. 3.7) (раціональні режими ведення поїзда $u^{\text{рац}}$ для ухилів $i = -3 \div +1,5 \text{ ‰}$ наведено в дод. В).

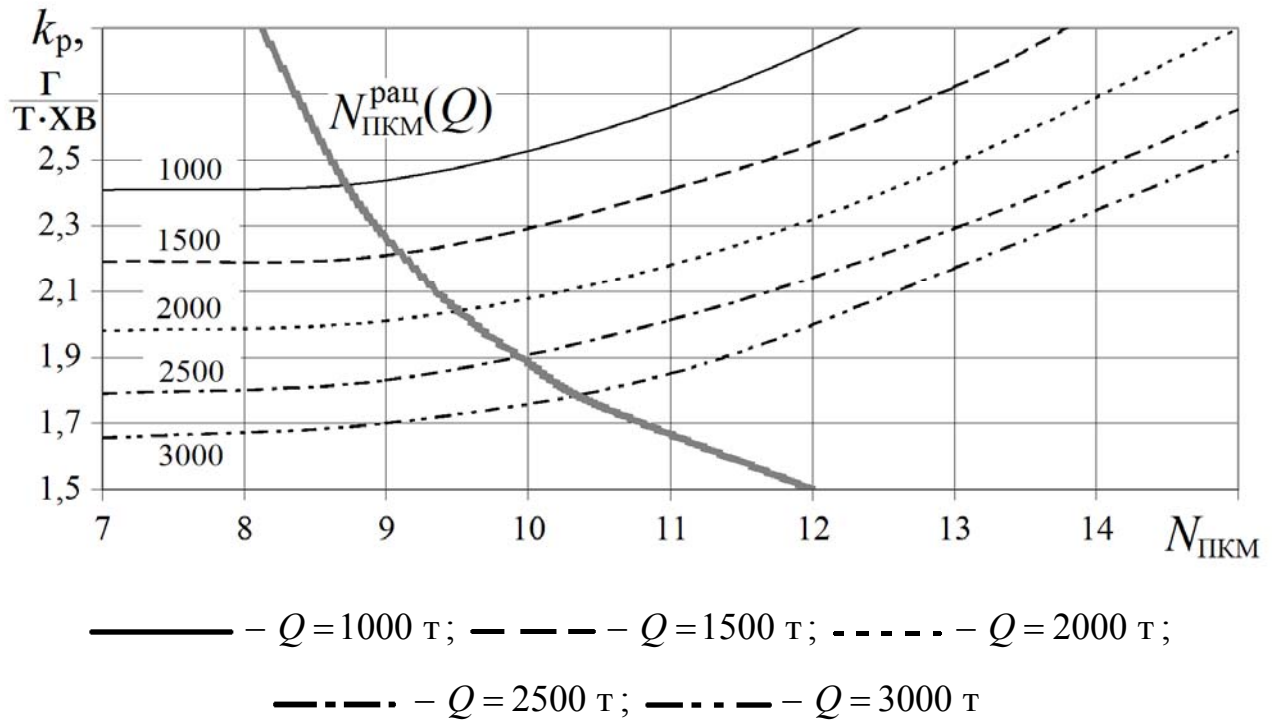


Рисунок 3.7 – Раціональні режими ведення поїзда для ухилу $i = -1,5$ ‰

При побудові функцій раціональних режимів для інших значень ухилів отримуємо подібні залежності коефіцієнта питомої витрати палива при розгоні. При цьому маємо тривимірну залежність дискретних значень раціональних позицій контролера машиніста, залежних від маси складу та ухилу (рис. 3.8)

$$N_{ПКМ} = \begin{bmatrix} 7,5 & 8 & 8,3 & 8,9 & 9,5 \\ 8,7 & 9,2 & 9,6 & 10 & 10,4 \\ 10,2 & 10,6 & 11 & 11,3 & 11,5 \\ 11,6 & 12,2 & 12,7 & 13,2 & 13,4 \\ 13,2 & 13,5 & 13,8 & 14,3 & 14,6 \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

У реальних умовах при формуванні поїздів та прямуванні по ділянці значення ухилу та маси складу відрізняються від наведених. Тому для визначення проміжних значень раціонального режиму керування локомотивом доцільно ввести інтерпольовану функціональну залежність позиції керування [108]

$$u^P = N_{ПКМ} = f(Q, i). \quad (3.16)$$

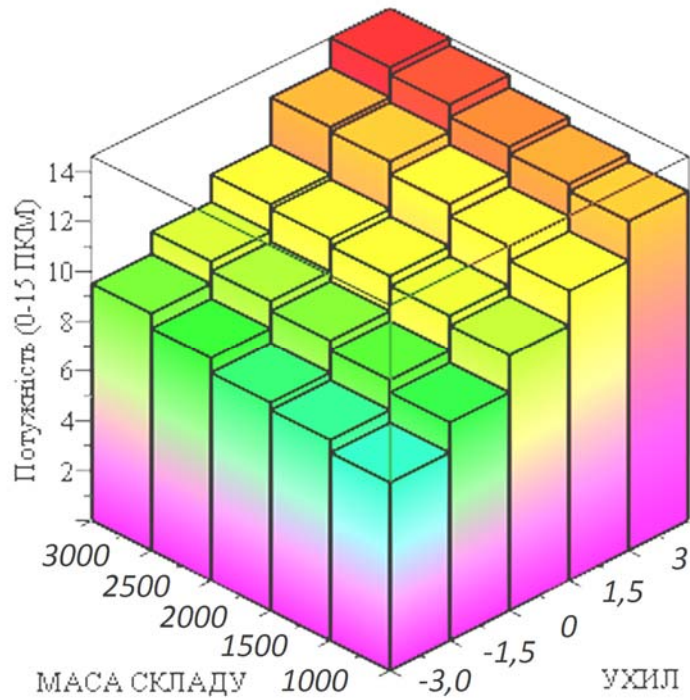


Рисунок 3.8 – Раціональні значення $N_{\text{ПКМ}}$

Для можливості розрахунку $N_{\text{ПКМ}}^{\text{рац}}(Q, i)$ для проміжних значень маси складу застосовуємо інтерполяцію в межах конкретного ухилу i для мас складу, більших та менших за дану, округлену до 10^3 т вгору \bar{Q} та вниз \underline{Q}

$$N_{\text{ПКМ}}^{\text{рац}}(\underline{Q} \leq Q < \bar{Q}, i) = N_{\text{ПКМ}}^{\text{рац}}(\underline{Q}, i) \cdot \left(1 - \frac{Q - \underline{Q}}{\Delta Q}\right) + N_{\text{ПКМ}}^{\text{рац}}(\bar{Q}, i) \cdot \left(1 - \frac{\bar{Q} - Q}{\Delta Q}\right). \quad (3.17)$$

Графічна інтерпретація $N_{\text{ПКМ}}^{\text{рац}} = f(Q, i)$ наведена на рис. 3.9. Відповідність функції (3.16) дискретним даним (див. рис. 3.8) складає 99,9 % у вказаному діапазоні значень мас складу та ухилів.

3.2.2 Визначення енергозаощаджуючих режимів керування при тязі

Особливі умови, які накладаються на модель, – довжина ділянки $l = 20$ км, при цьому маса складу Q змінюється в межах $1000 \div 6000$ т з інтервалом 1000 т. Межі ухилів для ділянок складають $i = -4 \div 7,5$ %.

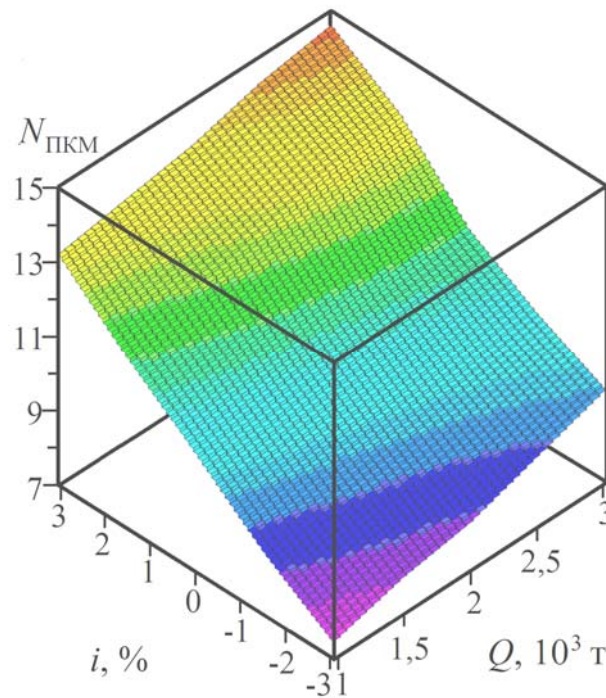


Рисунок 3.9 – Функція раціонального режиму керування локомотивом під час рушання та розгону $u^p = N_{ПКМ}^{рац}(Q, i)$

Довжина ділянки $l = 20$ км зумовлена тим, що при використанні ітераційного числення з кількістю кроків $n = 3$ ця довжина дає найбільш достовірний результат [109, 110].

Нижня межа ухилу зумовлена тим, під час руху на ділянках зі значенням ухилу $i < -2\%$, напрямок сили від ухилу збігається з напрямком руху для допустимого діапазону швидкостей, тому вона буде прискорювати поїзд. Верхня межа визначена аналітично. При значеннях ухилу $i > 7,5\%$ режим керування відповідає найбільшій потужності локомотива.

Після розв'язання рівняння руху поїзда для конкретних вихідних даних розраховується коефіцієнт питомої витрати палива під час руху на рівномірній швидкості $k_{рш}$

$$k_{рш} = \frac{10^6 \cdot g}{t \cdot \frac{Q \cdot v^2}{2}}, \quad (3.18)$$

де g – витрата палива, кг;

t – час ходу поїзда, год;

Q – маса складу, кг;

v – швидкість руху, м/с.

Таким чином, розмірність коефіцієнта $k_{рш}$

$$k_{рш} = \left[\frac{\text{кг}}{\text{год} \times \text{МДж}} \right]. \quad (3.19)$$

Фізичний зміст $k_{рш}$ – годинна витрата палива, що припадає на 1 МДж кінетичної енергії поїзда.

Приклад визначення значень коефіцієнта $k_{рш}$ для маси складу $Q = 2000$ т та ухилу $i = -0,5 \text{ ‰}$ наводимо у вигляді табл. 3.2, а графічну інтерпретацію на – рис. 3.10.

Таблиця 3.2

Значення коефіцієнта питомої витрати палива $k_{рш}$ під час руху на рівномірній швидкості

Позиція контролера машиніста	Рівномірна швидкість, км/год	$k_{рш}$, $\frac{\text{кг}}{\text{год} \cdot \text{МДж}}$	Позиція контролера машиніста	Рівномірна швидкість, км/год	$k_{рш}$, $\frac{\text{кг}}{\text{год} \cdot \text{МДж}}$
15	133,57	0,7061	7	85,52	0,5714
14	128,91	0,6604	6	78,09	0,5693
13	123,51	0,6340	5	71,29	0,5709
12	117,18	0,6133	4	63,91	0,5742
11	110,96	0,5976	3	54,60	0,5792
10	104,91	0,5880	2	48,90	0,5869
9	98,03	0,5798	1	41,43	0,6100
8	91,84	0,5756	0	31,31	0,6634

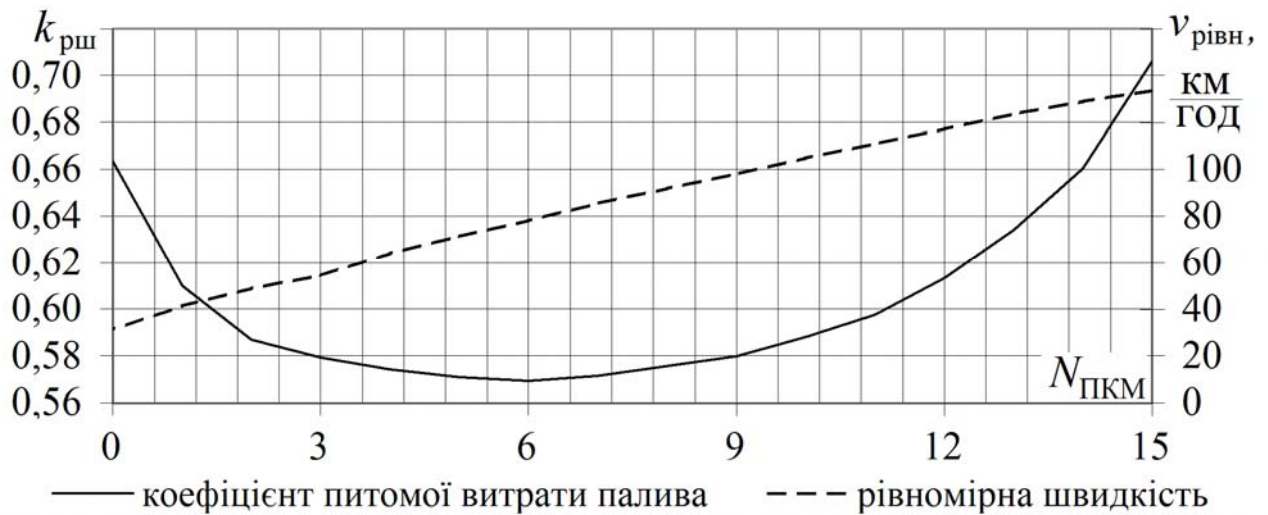


Рисунок 3.10 – Залежність коефіцієнта питомої витрати палива $k_{рш}$ під час

руху на рівномірній швидкості від позиції контролера машиніста

$$(Q = 2000 \text{ т, } i = -0,5\%)$$

Після інтерполяції поліномом четвертого степеня отримуємо залежність

$$k_{рш} = 2,29 \cdot 10^{-5} \cdot PKM^4 - 6,98 \cdot 10^{-4} \cdot PKM^3 + 8,63 \cdot 10^{-3} \cdot PKM^2 - 4,69 \cdot 10^{-2} \cdot PKM + 0,662. \quad (3.20)$$

За допомогою математичного пакету Maple [111] визначаємо мінімальне значення функції та відповідне значення аргументу.

$$\begin{aligned} & \text{extrema}(k_{рш}, \{\}, PKM, 'PKM_{\min}'); \\ & PKM_{\min}; \\ & \{0.569815389\}; \\ & \{PKM = 5.500811924\}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Оскільки значеннями позицій контролера машиніста можуть бути лише цілі числа, виконуємо округлення до найближчого цілого числа

$$PKM_{\min} = 6. \quad (3.22)$$

Для деяких значень ухилу та маси складу мінімальні значення коефіцієнта питомої витрати палива $k_{рш \min}$ відповідають значення рівномірної швидкості, вищої за допустиму за конструкційними параметрами рухомого складу, тому вводимо додатковий обмежувальний параметр

$$v^{\text{рівн}} \leq v^{\text{доп}}. \quad (3.23)$$

Цільова функція (загальна умова) раціонального режиму керування для фази руху з увімкненими ТЕД

$$u^T = N_{\text{ПКМ}_{\text{max}_v}}^{\text{рац}} \min_{k_{\text{рш}}} = \begin{cases} k_{\text{рш}} \rightarrow \min; \\ v^{\text{рівн}} \leq v^{\text{доп}}. \end{cases} \quad (3.24)$$

Після отримання аргументів за мінімальних значень функції коефіцієнта питомої витрати палива під час руху на рівномірній швидкості для $Q = 1000; 2000 \dots 6000$ т та $i = -4; -2,5 \dots 7,5$ ‰ зводимо їх до табл. Г.1, а графічну інтерпретацію наводимо на рис. 3.11.

Відповідні значення рівномірних швидкостей $v^{\text{рівн}} \square N_{\text{ПКМ}_{\text{max}_v}}^{\text{рац}} \min_{k_{\text{рш}}}$ наводимо в табл. Г.2, а графічну інтерпретацію – на рис. 3.13.

Для можливості застосування дискретних даних матриці $PKM_{\text{max}_v}^{\min_{k_{\text{рш}}}}$ та відповідних рівномірних швидкостей $v^{\text{рівн}}$ у математичній моделі необхідно виконати інтерполяцію. Інтерполяцію виконуємо лінійним сплайном для мас складу вказаного діапазону з аргументом ухилу $i(s)$. Для прикладу наводимо сплайн $PKM_{\text{max}_v}^{\min_{k_{\text{рш}}}}$ для маси складу $Q = 6000$ т

$$PKM^{6000} = \left\| \begin{cases} 0, & i < -1; \\ 20 + 20i, & i < -0,5; \\ 12 + 4i, & i < 0; \\ 12 + 4i, & i < 0,5; \\ 14, & i < 1; \\ 14, & i < 1,5; \\ 11 + 2i, & i < 2; \\ 15 & otherwise. \end{cases} \right\|. \quad (3.25)$$

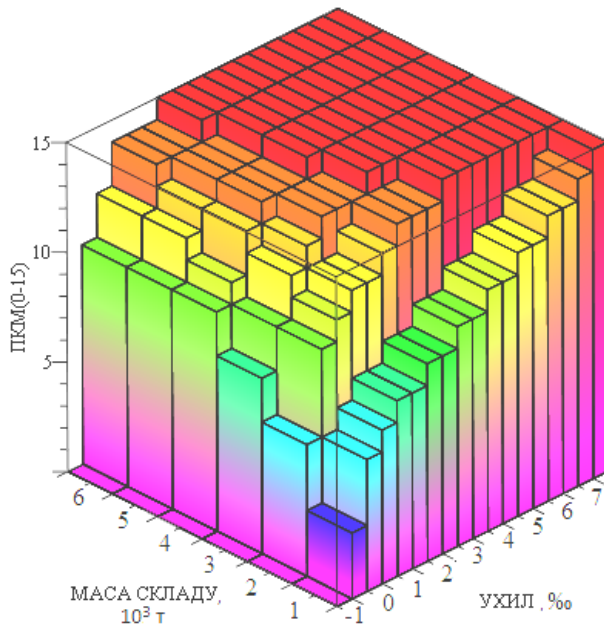


Рисунок 3.11 – Значення $N_{ПКМ}$,
відповідні $\min k_{рш}$ та $\max v \leq v^{доп}$

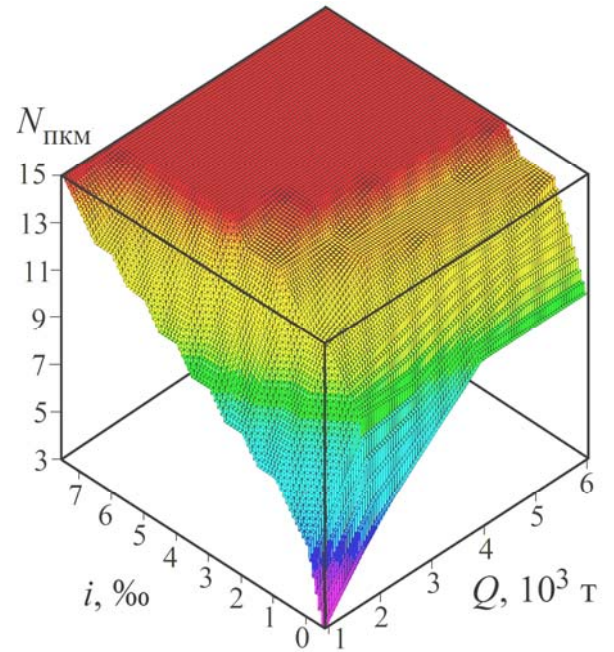


Рисунок 3.12 – Функція раціонального
режиму керування локомотивом під
час руху на рівномірній швидкості

$$u^T = N_{ПКМ}^{рац} \frac{\min k_{рш}}{\max v}$$

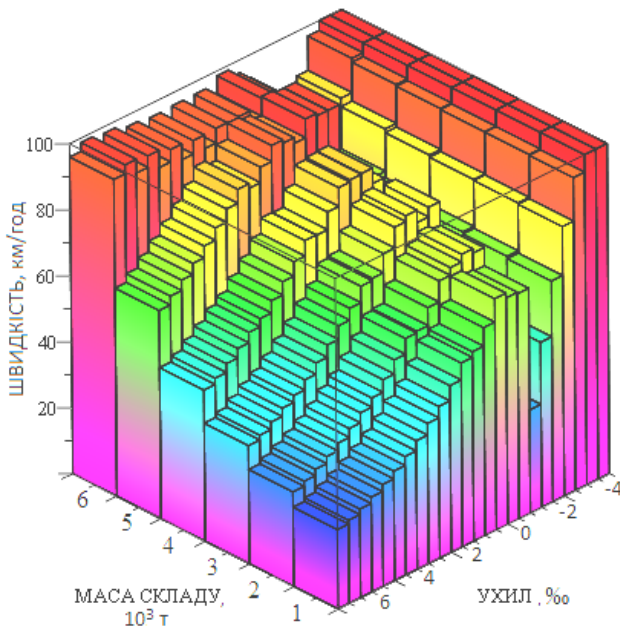


Рисунок 3.13 – Рівномірні швидкості
 $v_{рівн}$ відповідні $\min k_{рш}$ та $\max v \leq v^{доп}$

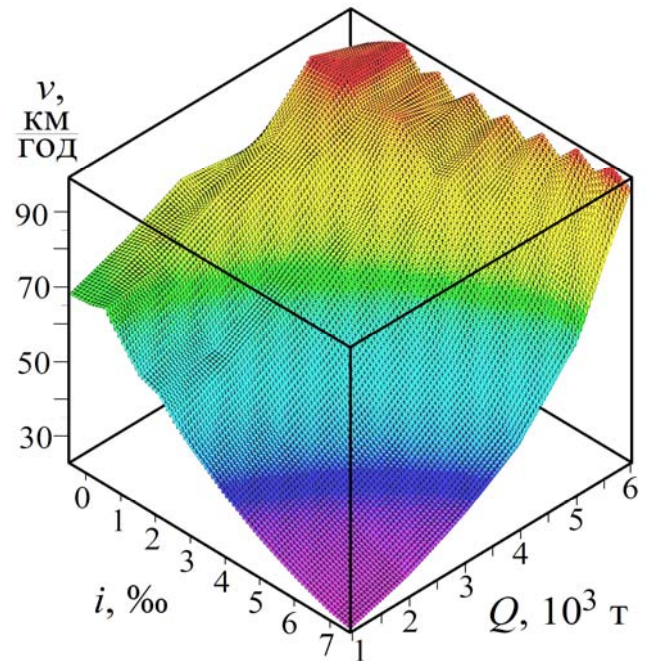


Рисунок 3.14 – Функція раціональних
рівномірних швидкостей

$$v_{рівн} \square N_{ПКМ}^{рац} \frac{\min k_{рш}}{\max v}$$

Для можливості розрахунку $PKM_{maxv}^{min_{k_{рш}}}$ для проміжних значень маси складу $\underline{Q} \leq Q < \bar{Q}$ застосовуємо інтерполяцію в межах конкретного ухилу i для мас складу, більших та менших за дану, округлену до 10^3 т вгору \bar{Q} та вниз \underline{Q} за формулою (3.17).

Для визначення рівномірної швидкості, що відповідає $PKM_{\underline{Q} \leq Q < \bar{Q}}$, виконуємо аналогічні обчислення, але без округлення величин.

Після обчислення $PKM_{\underline{Q} \leq Q < \bar{Q}}$ визначається сила тяги

$$F_j = \frac{3,6 \cdot N_e \left(PKM_{\underline{Q} \leq Q < \bar{Q}} \right) \cdot n_c \cdot \eta_{j-1}}{v_{j-1} \pm \Delta v} \quad (3.26)$$

та вирішується рівняння руху поїзда.

Таким чином крива $v = f(s)$ прагне наблизитись до рівномірної швидкості (рис. 3.15).

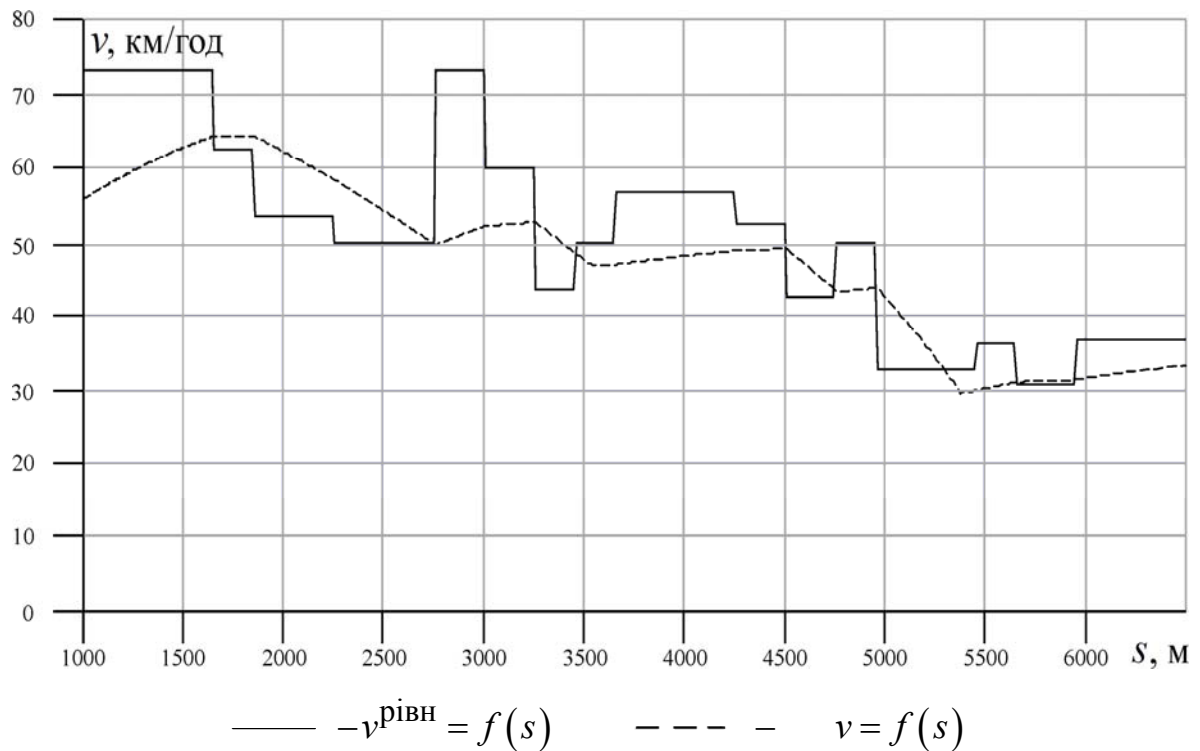


Рисунок 3.15 – Крива швидкості руху поїзда

3.2.3 Визначення раціональної тривалості вибігу

Для зменшення витрат енергоресурсів при зміні режиму руху тяга-гальмування доцільно використовувати проміжний режим вибігу [112]. Для визначення раціональних характеристик, що описують режим вибігу, сформулюємо таку задачу.

Нехай поїзд рухається по деякій ділянці, що має однорідний профіль (рис. 3.16). Щоб забезпечити зупинку поїзда в заданому пункті (або зниження швидкості до заданої величини), гальмування повинно бути виконане з таким розрахунком, щоб швидкість змінювалася по лінії bcd . Таким чином, при переході з режиму тяги в режим гальмування без проміжного вибігу швидкість буде змінюватися по лінії $abcd$, а в разі застосування вибігу – по лінії acd .

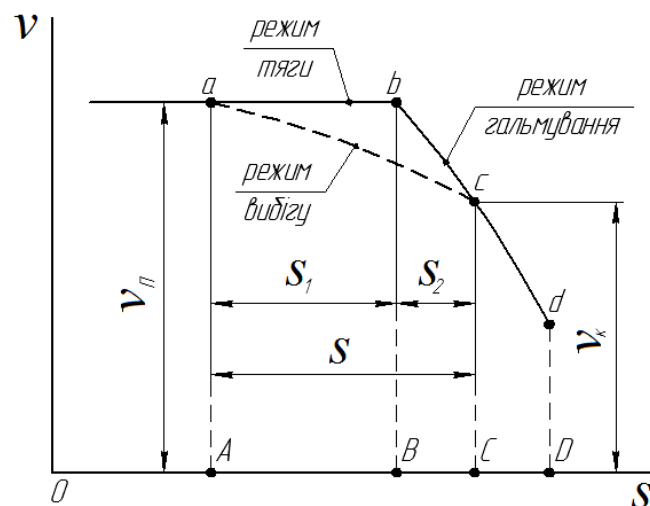


Рисунок 3.16 – Траєкторії руху поїзда із застосуванням різних режимів

Як видно з рис. 3.16, зменшення витрат енергоресурсів при застосуванні режиму вибігу відбувається на ділянці $s_1 = s - s_2$. Але при цьому зменшується технічна швидкість на ділянці $A - C$, що призводить до збільшення часу ходу поїзда по всій ділянці.

Збільшення часу ходу поїзда Δt на ділянці $A - D$ із застосуванням вибігу становить

$$\Delta t = t - t_1 - t_2, \quad (3.27)$$

де t – час руху в режимі вибігу на ділянці $A - C$ (s);

t_1 – час руху в режимі тяги на ділянці $A - B$ (s_1);

t_2 – час руху в режимі гальмування на ділянці $B - C$ (s_2).

Для отримання залежності між зниженням витрат енергоресурсів та збільшенням часу ходу поїзда виконані тягові розрахунки для різних варіантів вихідних даних:

– зміна початкової швидкості гальмування (швидкість в точці c , рис. 3.13) $v_{\Pi}^F = 80 \div 0$ км/год;

– зниження швидкості в режимі вибігу (інтервал швидкості в точках $a - c$, рис. 3.13) $v^B = 0 \div 80$ км/год;

– варіативний профіль ділянки: $i = -0,5 \div 7,5$ ‰;

– варіативна маса складу: $Q = 1000 \div 6000$ т.

Приклад тягового розрахунку для ухилу $i = 2,5$ ‰, початкової швидкості $v_{\Pi} = 80$ км/год, маси складу $Q = 3000$ т та зниження швидкості в режимі вибігу $v^B = 0 \div 80$ км/год наведено на рис. 3.17.

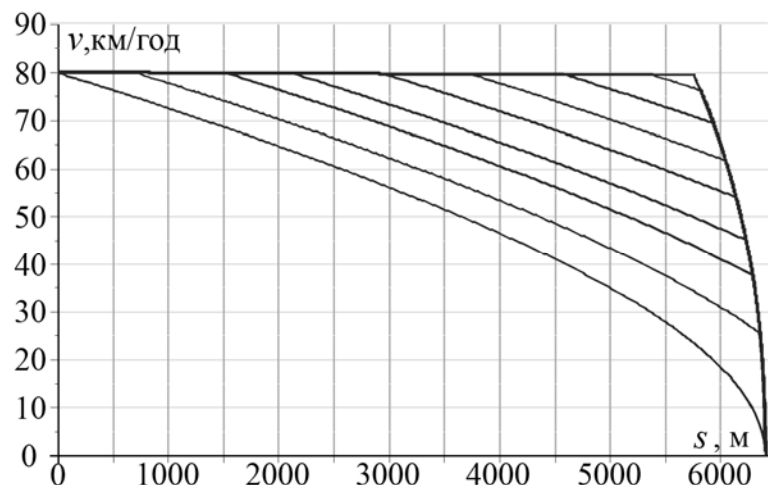


Рисунок 3.17 – Побудова кривих $v = f(s)$ з використанням математичної моделі

За результатами тягових розрахунків отримані дані про витрату енергоресурсів q та час ходу поїзда t для різних величин ухилів та зниження швидкостей під час вибігу. Для прикладу наводимо фрагмент результатів для маси складу $Q = 3000$ т та ухилу $i = 2,5$ ‰ (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Результати тягово-енергетичних розрахунків для маси складу $Q = 3000$ т
та ухилу $i = 2,5$ ‰

Початкова швидкість режиму вибігу v_{Π}^B , км/год	Початкова швидкість режиму гальмування $v_{\Pi}^Г$, км/год	Інтервал швидкості режиму вибігу v^B , км/год	Час ходу поїзда t , хв	Витрата дизельного палива q , кг	Коефіцієнт енерго-ефективності вибігу k^B
79,4	79,4	0,0	5,20	61,7	0
79,4	76,9	2,5	5,21	58,6	489
79,5	74,4	5,0	5,22	55,5	1882
79,5	71,8	7,6	5,25	52,4	4052
79,5	69,2	10,3	5,27	49,4	6888
79,5	66,4	13,2	5,30	46,1	10467
79,6	63,6	15,9	5,37	43,0	14146
79,6	60,8	18,8	5,41	40,0	18151
79,6	57,8	21,8	5,51	36,9	22067
79,6	54,8	24,8	5,61	33,9	25891
79,7	51,7	28,0	5,71	30,9	29489
79,7	48,6	31,1	5,82	27,9	32243
79,7	45,1	34,6	5,99	24,9	34609
79,8	41,6	38,1	6,18	21,9	35777
79,8	37,7	42,1	6,42	19,0	36398
79,8	33,6	46,2	6,69	16,3	36100
79,9	29,1	50,8	7,00	13,3	33900
79,9	23,4	56,5	7,50	10,3	30398
80,0	16,6	63,3	8,14	7,55	25810
80,0	5,2	74,8	9,46	4,97	20400
80,0	0,0	80,0	11,36	5,60	21900

За результатами тягових розрахунків побудовано залежності витрати палива q та часу ходу поїзда t від інтервалу швидкості режиму вибігу v^B для вказаних варіацій ухилу i та маси складу Q . На рис. 3.18 наведено графічні залежності $q = f(v^B)$, $t = f(v^B)$ для маси складу $Q = 3000$ т та ухилу $i = 2,5$ ‰.

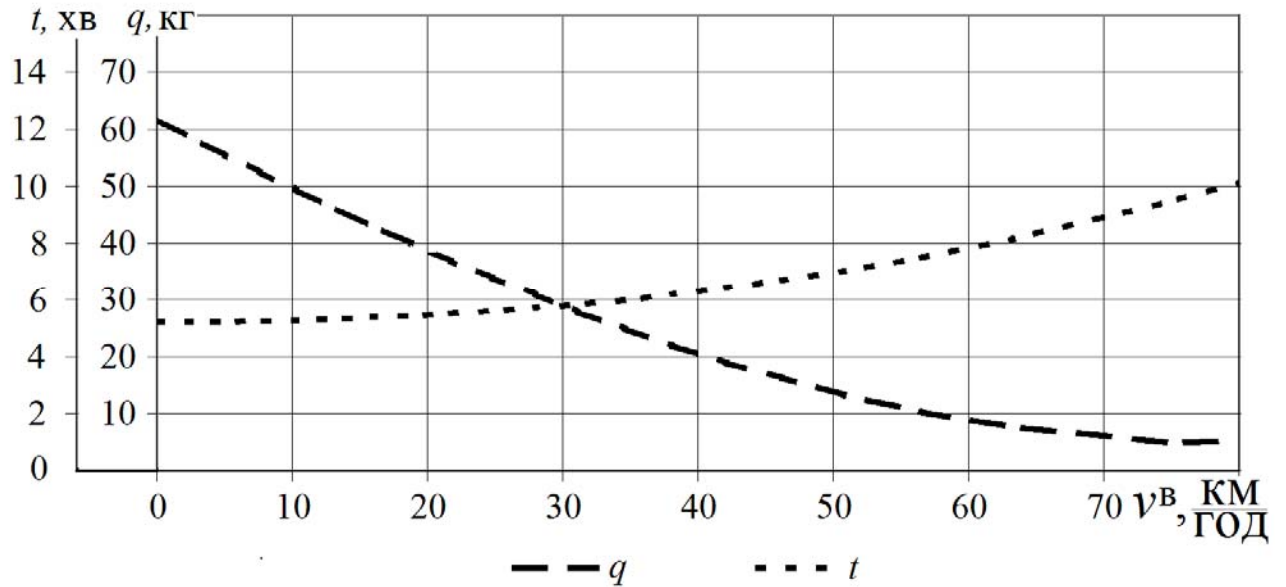


Рисунок 3.18 – Залежності витрати палива q та часу ходу поїзда t від зниження швидкості в режимі вибігу для маси складу $Q = 3000$ т та ухилу $i = 2,5$ ‰

Оскільки наведені залежності не мають екстремумів та поводяться монотонно у вказаному діапазоні швидкостей v^B , то для визначення значень раціонального зниження швидкості в режимі вибігу вводимо коефіцієнт енергоефективності вибігу k^B . Значення k^B в $\frac{\text{КГ} \times \text{МДж}}{\text{ГОД}}$ визначаємо за формулою

$$k^B = \frac{q \cdot Q \cdot \frac{(v^B)^2}{2}}{10^6 \cdot t}. \quad (3.28)$$

Фізичний зміст k^B – годинна витрата палива, що відповідає зменшенню кінетичної енергії поїзда.

Результати розрахунків коефіцієнта енергоефективності вибігу k^B для маси складу $Q = 3000$ т та ухилу $i = 2,5$ ‰ заносимо в табл. 3.2 та будуємо відповідну залежність (рис. 3.19). Для інших значень маси складу та ухилу залежності наведено в дод. Д.

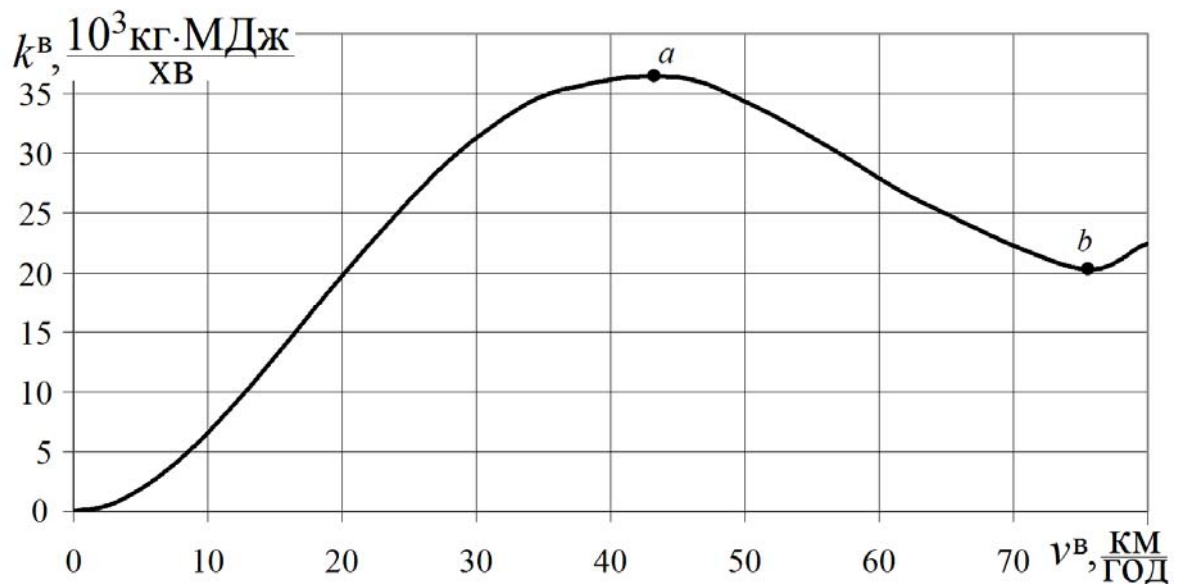


Рисунок 3.19 – Залежність коефіцієнта енергоефективності вибігу k^B для маси складу $Q = 3000$ т та ухилу $i = 2,5$ ‰

З графіка бачимо, що 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 зростання часу ходу поїзда t .

Отже, можна зробити висновок: при регульовальному вимушеному зниженні швидкості доцільно змінювати швидкість до значення коефіцієнта k^B , що відповідає екстремуму в точці a , а при остаточному гальмуванні – до значення коефіцієнта k^B в точці b .

На підставі побудованих залежностей $k^B = f(v^B)$ для вказаних вихідних даних ($i = -0,5 \div 7,5$ ‰; $Q = 1000 \div 6000$ т) визначаємо екстремуми та відповідні швидкості, які зводимо до табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Раціональні значення зниження швидкості v^B в режимі вибігу

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

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

Графічна інтерпретація отриманих результатів наведена на рис. 3.20, 3.21.

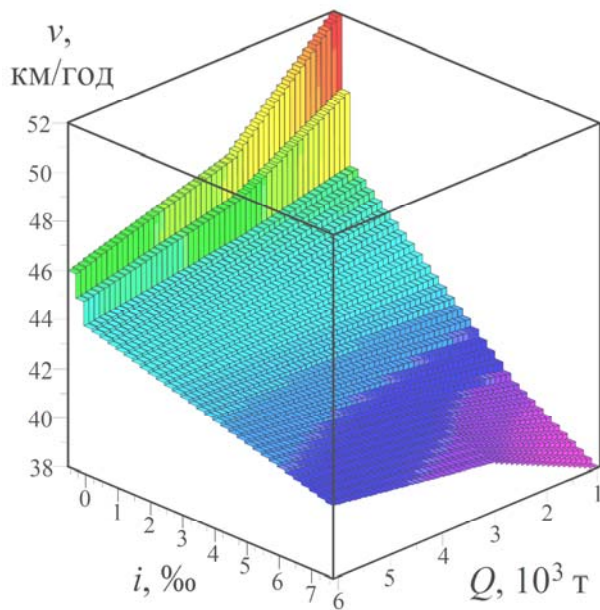


Рисунок 3.20 – Раціональні значення v^B при регульовальному зниженні швидкості

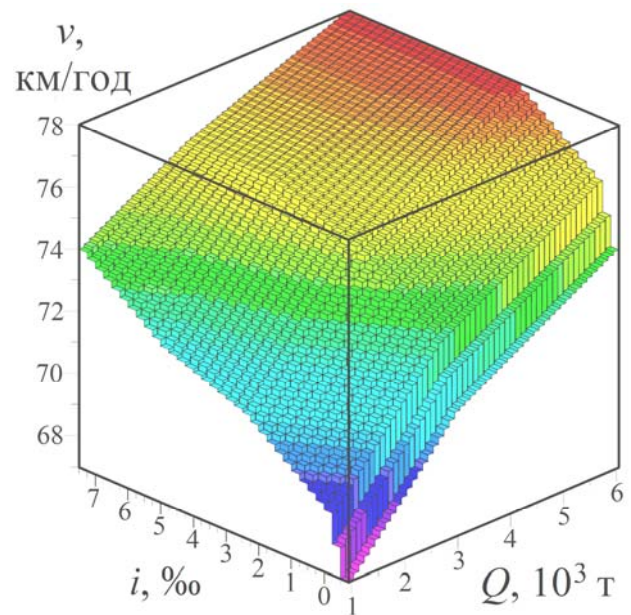


Рисунок 3.21 – Раціональні значення v^B при остаточному гальмуванні

3.4 Розв'язання задачі прицільного гальмування

Гальмування виконується зміною кінетичної енергії поїзда для його

зупинки або регулювання швидкості шляхом створення зовнішньої сили. Гальмівна сила поїзда може створюватися фрикційними (механічне гальмування) або електричними системами (електричне гальмування). Керування фрикційними гальмівними системами може бути пневматичним (повітряним) або електропневматичним.

Фрикційні пневматичні гальма гасять кінетичну енергію поїзда в результаті тертя гальмівних колодок по бандажах коліс. Вони діють при розрядці гальмівної магістралі. При цьому гальма кожного вагона послідовно приходять у дію в міру поширення гальмівної хвилі уздовж поїзда, що у разі довгосоставного поїзда знижує швидкість та створює значну поздовжню динаміку, а це може привести до розриву поїзда.

Система керування електропневматичними гальмами забезпечує одночасне спрацювання гальм усіх вагонів поїзда, що покращує керованість гальмами та підвищує безпеку руху. Електропневматичними гальмами обладнуються тільки пасажирські поїзди.

У системі електричного гальмування, що базується на використанні принципу зворотності електричних машин, кінетична енергія поїзда перетворюється в електричну енергію при роботі тягових електродвигунів у генераторному режимі. Реактивний момент, який створюється тяговими електродвигунами, діє в напрямку, протилежному напрямку обертання колісної пари локомотива, у результаті чого виникає гальмівна сила.

При реостатному гальмуванні створена електроенергія гаситься в резисторах локомотива. Ефективність електричного гальмування полягає у зменшенні зносу бандажів колісних пар та гальмівних колодок, у підвищенні ходової швидкості руху поїздів при регульованому гальмуванні завдяки автоматичному підтримуванню постійної швидкості на заданому рівні.

Фрикційні гальма є основними. Залежно від мети гальмування розрізняють такі режими гальмування: екстрене, повне службове, зупинне (службове для зупинки поїзда на роздільних пунктах), регульовальне.

Екстрене гальмування застосовується для зупинки поїзда в надзвичайних

випадках. При цьому повністю використовується гальмівна сила поїзда.

Повне службове гальмування використовується для розрахунку відстані встановлення постійних сигналів. Гальмівна сила при цьому використовується на 80 %.

Службове гальмування застосовується для зупинки поїзда. Гальмівна сила при цьому використовується на 50 %. Таке гальмування досягається зниженням тиску в магістралі в один прийом на 0,15-0,17 МПа від встановленого зарядного.

Регульовальне гальмування застосовується для підтримування швидкості руху поїзда на заданому рівні. Гальмівна сила при цьому змінюється залежно від положення рукоятки крана машиніста (РКМ). Якщо крутизна спуску, на якому потрібно використати регульовальне гальмування, не перевищує 4 %, то використовуються прямодіючі гальма локомотива.

У результаті розв'язання рівняння руху поїзда при гальмівних розрахунках визначають залежність між швидкістю руху, часом ходу та пройденим шляхом при дії сповільнювальних сил. Розглянемо визначення довжини дійсного гальмівного шляху розв'язанням диференціального рівняння руху явним методом з урахуванням часу наповнення циліндрів для $Q = 3000$ т та $v_{\Pi} = 80$ км/год.

У цьому випадку інтегрування рівняння руху здійснюється по інтервалах часу для врахування впливу підвищення розрахункового гальмівного коефіцієнта вантажного поїзда в процесі наповнення гальмівних циліндрів. Значення підвищення розрахункового гальмівного коефіцієнта наведені в табл. 3.5. Результати розрахунків наводимо в табл. 3.6 та на рис. 3.22.

Таблиця 3.5

Підвищення розрахункового гальмівного коефіцієнта ϑ_p вантажного поїзда в процесі наповнення гальмівних циліндрів для складу масою $Q = 3000$ т [64]

$\Delta t, \text{с}$	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24	24-27
ϑ_p	0	0,2	0,45	0,65	0,8	0,9	0,95	0,98	1

Таблиця 3.6

Результати розрахунку гальмівного шляху

t , хв	s , м	v , км/год	t , хв	s , м	v , км/год
0	0	80	0,72	800,4	47,0
0,06	79,8	79,6	0,78	845,6	43,3
0,12	158,9	78,5	0,84	886,9	39,4
0,18	236,5	76,6	0,9	924,3	35,3
0,24	311,9	74,1	0,96	957,5	31,1
0,3	384,5	71,1	1,02	986,5	26,7
0,36	454,1	68,0	1,08	1011	22,1
0,42	520,4	64,7	1,14	1031	17,1
0,48	583,4	61,3	1,2	1045	11,6
0,54	643,0	57,8	1,26	1053	5,35
0,6	699,0	54,3	1,32	1055	-2,36
0,66	751,5	50,7			

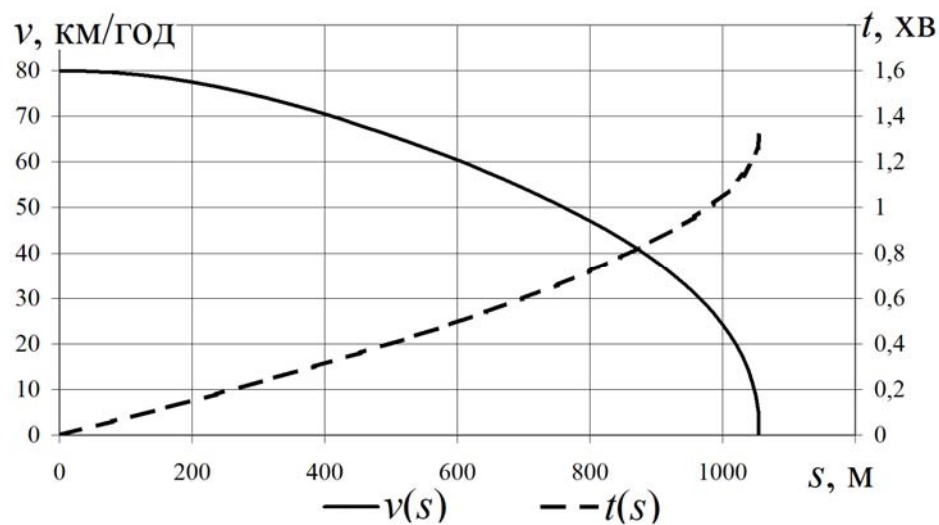


Рисунок 3.22 – Результати розрахунку гальмівного шляху

Задача прицільного гальмування розв'язується таким чином. З точки остаточної зупинки поїзда $s = s_{зуп}$ будуємо криву гальмування до конструкційної швидкості $v = v_k$ в напрямку точки відправлення поїзда ($s_{j+1} = s_j - \Delta s$) та складаємо її лінійний сплайн $v_{гальм} = f(s)$. Точку $s_{\Gamma}(v_k)$ задаємо як перевірочну. У міру наближення поїзда до точки зупинки $s_{зуп}$ після перетину координати $s_{\Gamma}(v_k)$ змінюється інтервал ітерацій $\Delta s = 1$ м та в кожній

ітерації перевіряємо умову

$$v_j(s_j) \geq v_{\text{гальм}} = f(s). \quad (3.29)$$

У разі недотримання умови (3.29) модель будує криву гальмування за наведеним вище алгоритмом. Таким чином одержуємо точку зупинки поїзда з точністю $S_j = S_{\text{зуп}} + 1$ м.

3.5 Узгодження раціональної траєкторії руху поїзда з графіком

Розв'язання рівняння руху поїзда у вигляді залежності співвідношення час ходу поїзда – витрата енергоресурсів (рис. 3.23) досягається зміною:

- керування регулюванням потужності локомотива під час фази рушання та розгону Φ^P ,
- фази руху з увімкненими тяговими двигунами Φ^T ,
- умов увімкнення та величини вибігу Φ^B .

За вищенаведеним алгоритмом потужність локомотива, яка задається функціями раціонального керування в окремих режимах, прагне встановити поточну швидкість, відповідну раціональній рівномірній. Тому є можливість змінювати як витрату енергоресурсів, так і час ходу поїзда коригуванням раціональних рівномірних швидкостей, які задані функцією $v^{\text{рівн}} = f(s)$, які отримані на підставі раціональних залежностей $v_{\text{рац}}^{\text{рівн}}$, множенням на коефіцієнт $k^{\text{кор}}$ (рис. 3.20).

$$v^{\text{рівн}}(s) = v_{\text{рац}}^{\text{рівн}}(s) \cdot k^{\text{кор}}. \quad (3.30)$$

При цьому, необхідно враховувати те, що на ухилах, значення яких відповідають прискоренню поїзда без включення тягового режиму, раціональна рівномірна швидкість змінюватися не буде. До того ж виникає можливість «грубої» оцінки часу ходу поїзда шляхом визначення інтегрального часу ходу поїзда по ділянці

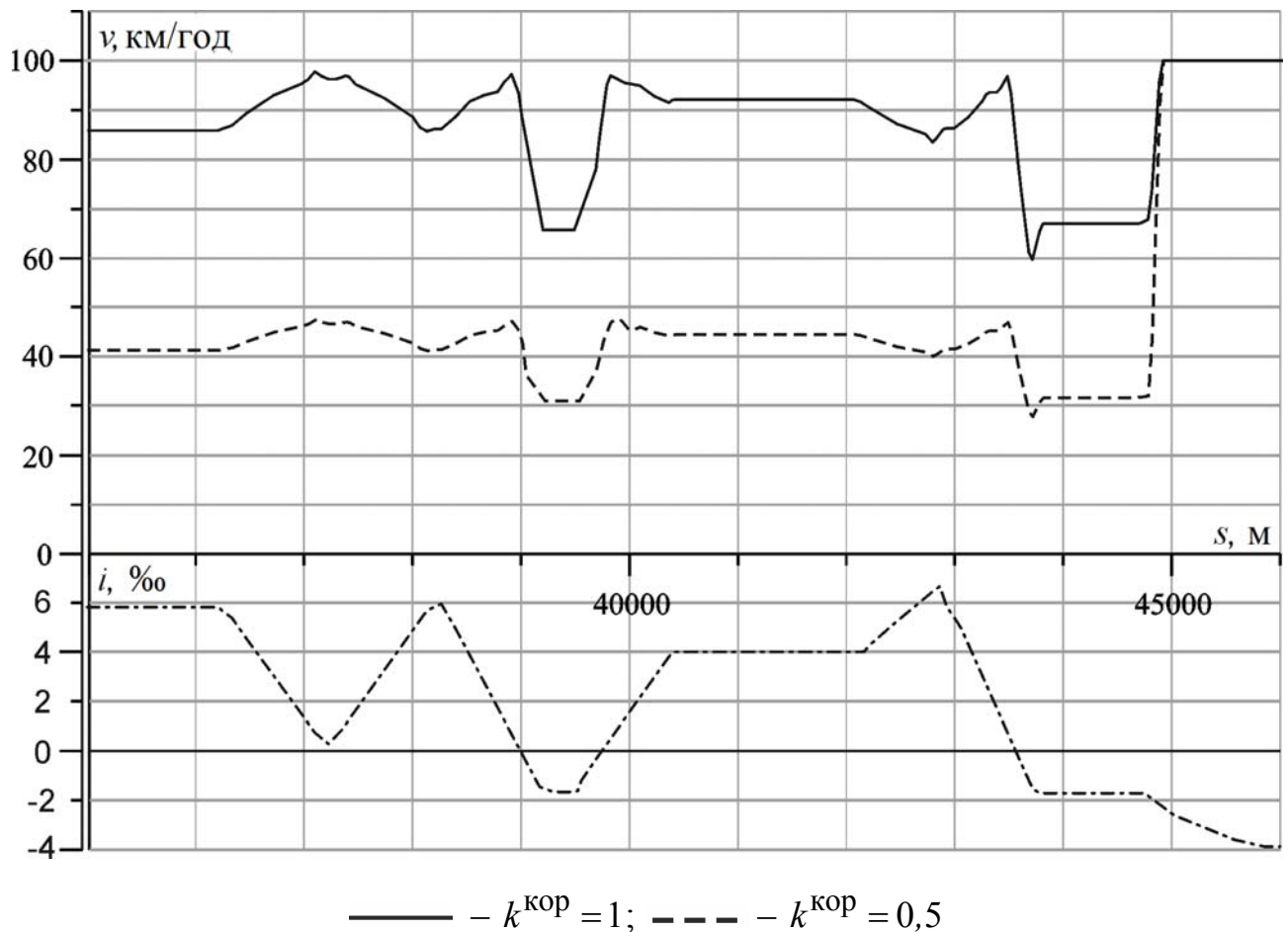
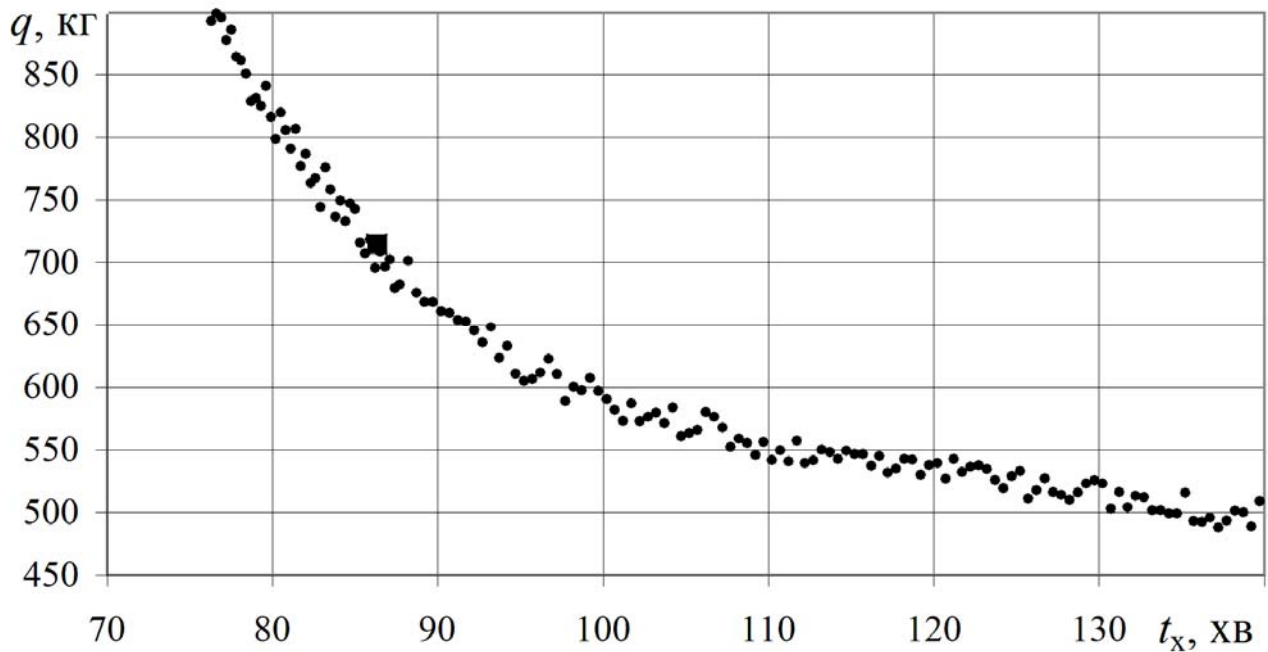


Рисунок 3.23 – Варіант коригування $v^{\text{рівн}} = f(s)$

$$t_x = \frac{60 \cdot s_{\text{діл}}}{1000 \cdot \int_{s_{\text{відпр}}}^{s_{\text{зуп}}} v^{\text{рац}} ds}, \quad (3.31)$$

де $s_{\text{зуп}}$, $s_{\text{відпр}}$ – координата відправлення та зупинки поїзда відповідно.

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 таку залежність витрати палива від часу ходу поїзда $q = f(t_x)$ для ділянки Пологи–Волноваха в зворотному напрямку при масі складу $Q = 4933$ т (рис. 3.24).



■ – результати за першим наближенням ($k^{\text{кор}} = 1$)

Рисунок 3.24 – Результати розв’язання рівняння руху поїзда у вигляді залежності співвідношення витрата енергоресурсів – час ходу поїзда $q = f(t_x)$

Висновки до розділу 3

1. На підставі аналізу критеріїв оптимальності обрано оптимізацію показників за комплексним адитивним критерієм мінімізації; за діапазонами дослідження – локальну оптимізацію; за кількістю керованих параметрів цільової функції обрано методи багатовимірної пошуку. Відповідно цих критеріїв оптимальності математична модель руху поїзда найбільш точно описує процес переміщення поїзда по ділянці.

2. Виконано аналіз параметрів, які впливають на економічність режиму ведення. За параметри оптимізації режиму керування обрано час ходу поїзда та витрату енергоресурсів. Складено умову та цільову функцію оптимізації – режим ведення поїзда оптимізувати за двома параметрами – мінімізувати час ходу поїзда та витрату енергоресурсів.

3. Для виконання тягових розрахунків з визначення функціональних залежностей раціонального керування локомотивом адаптовано математичну модель руху поїзда урахуванням нелінійних залежностей характеристик дизеля,

кіл керування, гальмівного обладнання, електричних та механічних елементів передачі потужності, що дозволило більш точно визначати параметри, які впливають на створення тягово-гальмівних сил та витрату енергоресурсів.

4. Локальну оптимізацію виконано для окремих фаз руху: рушання та розгону, тяги, вибігу та гальмування. На підставі аналізу залежностей коефіцієнтів енергоефективності для відповідних фаз руху визначено раціональні співвідношення маси складу, ухилу, позиції керування та швидкості руху. Побудовано функції двох змінних (маси складу та ухилу) раціонального керування локомотивом, які дозволяють одержати індивідуальну енергозаощаджуючу траєкторію руху поїзда.

5. Обчислення рівномірних швидкостей руху на підставі складених енергозаощаджуючих функцій режимів керування тяговим рухомим складом дозволило раціонально розподіляти час ходу поїзда по перегонах.

6. Удосконалено метод виконання тягових розрахунків, який дозволяє отримати розв'язок рівняння руху поїзда у вигляді співвідношення час ходу поїзда – витрата енергоресурсів, що дозволяє враховувати графіковий час руху при визначенні раціонального режиму керування.

4 РОЗРОБКА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ РЕЄСТРАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ЛОКОМОТИВА

4.1 Основні вимоги до апаратно-програмного комплексу реєстрації параметрів локомотива

Сьогодні підвищення рівня автоматизації – один з напрямків розвитку залізничного транспорту, який стосується різних компонентів залізничних автоматизованих систем як у нашій країні, так і за кордоном [113, 114, 115]. При цьому актуальною задачею є удосконалення бортових систем керування локомотивами для підвищення безпеки руху, ефективності керування локомотивом у цілому, поліпшення умов праці локомотивної бригади та ін.

Апаратно-програмний комплекс (АПК) призначений для збору та обробки інформації, одержуваної від первинних датчиків, встановлених на локомотиві.

Для забезпечення гнучкості та пристосування до конкретних завдань архітектура АПК повинна бути відкритою, що дозволить змінювати функціональні можливості та характеристики пристрою (обсяг пам'яті, кількість аналогових та дискретних сигналів, алгоритм опитування і т.д.) за рахунок підключення відповідних апаратних або програмних модулів. Це дозволяє створювати різні варіанти АПК залежно від розв'язуваної задачі. АПК повинен мати просту технологію зміни прикладного програмного забезпечення, здійснювати налаштування на певний режим роботи, перезапис інформації з АПК на проміжний носій або автоматично на серверний комплекс. Щодо технічних характеристик, то АПК має бути стійким до збоїв, не впливати на локомотивні пристрої. Він повинен безвідмовно працювати в умовах вібрацій та ударів, сильних електромагнітних перешкод, неминучих при роботі на борту локомотива.

У програмно-відстежуючих системах автоведення [116, 117, 118] та в системах реєстрації режимів роботи локомотива визначення сили тяги відбувається безперервно (дискретно) вимірюванням параметрів: струму, напруги, зусилля на автотчепі тощо. Одним із завдань АПК є визначення

тягових зусиль локомотива.

Одним із способів визначення потужності колісно-моторних блоків (КМБ) є розрахунок електричної потужності тягового електродвигуна з урахуванням його ККД та ККД тягового редуктора. Існують методи, що базуються на електротягових характеристиках КМБ локомотива. Параметром, що реєструється, є струм ТЕД. Визначення сили тяги виконується аналітично через обчислення електротягових характеристик КМБ. При цьому значення сили тяги є функцією одного аргументу $F = f(I_{\text{тед}})$. Більшу точність має метод розрахунку сили тяги з використанням характеристик намагнічування ТЕД $C\Phi = f(I_{\text{тед}})$ [119]. Цей метод не враховує неточності налаштування ослаблення поля ТЕД та відхилень перехідного опору групових перемикачів. Він є достатньо точним, але виникає необхідність вимірювання струму та напруги кожного електродвигуна.

Метод визначення сили тяги локомотива шляхом реєстрації зусилля на автотязі передбачає розв'язання задачі механіки та знаходження вектора сили тяги. Складність методу полягає в таруванні тензодатчиків розтягнення-стиснення автотязі, а тому він використовується в лабораторних умовах. При цьому вимірюється безпосередньо рівнодіюча між дотичною силою тяги та силою опору складу. Для визначення числового значення сили тяги необхідно розраховувати повну силу опору.

4.2 Обробка сигналів. Вибір первинних датчиків контролю параметрів

Визначення енергоефективних режимів ведення на локомотиві передбачає оперативний збір параметрів роботи ТРС, які створюють прискорювально-сповілюювальні сили.

В [4, 122, 123] описано один із способів отримання та передачі сигналів. За основні сигнали, на підставі яких можна визначити потужність локомотива, обираємо такі:

- струм тягових електродвигунів $I_{\text{я}}$;

- напругу тягових електродвигунів $U_{я}$;
- струм збудження ТЕД I_3 .

Схему передачі повідомлень приймаємо відповідно рис. 4.1 [120].

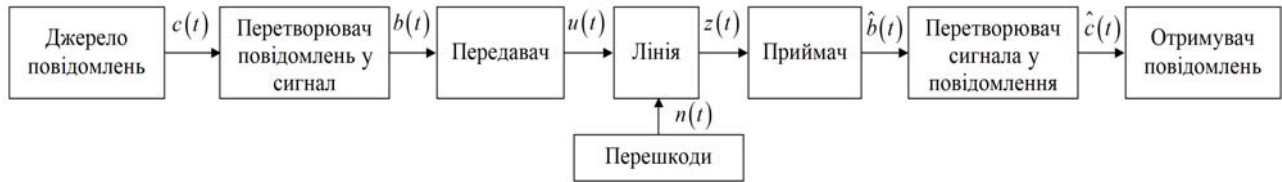


Рисунок 4.1 – Структурна схема передачі повідомлень

Як аналогові, так і цифрові сигнали можуть поширюватися у відповідних передавальних середовищах. У будь-якому середовищі аналоговий сигнал відчуває загасання (послаблюється). Цифрова передача даних меншою мірою обмежена ступенем послаблення сигналу [121]. З урахуванням того, що тяговий рухомий склад є зоною підвищених магнітних полів, які негативно впливають на передачу сигналів, то типом сигналів обираємо цифровий.

Вимірювання струму. Дослідження [4, 124] показали, що безконтактні вимірювання струму в умовах магнітонапруженого середовища не дають високої точності вимірів. Тому для забезпечення високої точності струм тягових електродвигунів $I_{я}$ та струм збудження I_3 доцільно вимірювати контактним методом на струмопровідних шунтах [125].

Електрична схема датчика вимірювання струму наведена на рис. 4.2. Вона працює таким чином. Струмопровідний шунт 75 мВ підключений до операційного підсилювача МСР607, який підсилює напругу шунта. Підсилена напруга подається на вхід мультівібратора NE555. Мультівібратор формує прямокутні імпульси, частота яких залежить від вхідної напруги. Вихід мультівібратора під'єднаний до цифрової оптопари РС814, яка виконує роль гальванічної розв'язки.

Вимірювання напруги. Визначення напруги з високою точністю передбачає безпосередньо контактні вимірювання. Електрична схема датчика напруги наведена на рис. 4.3.

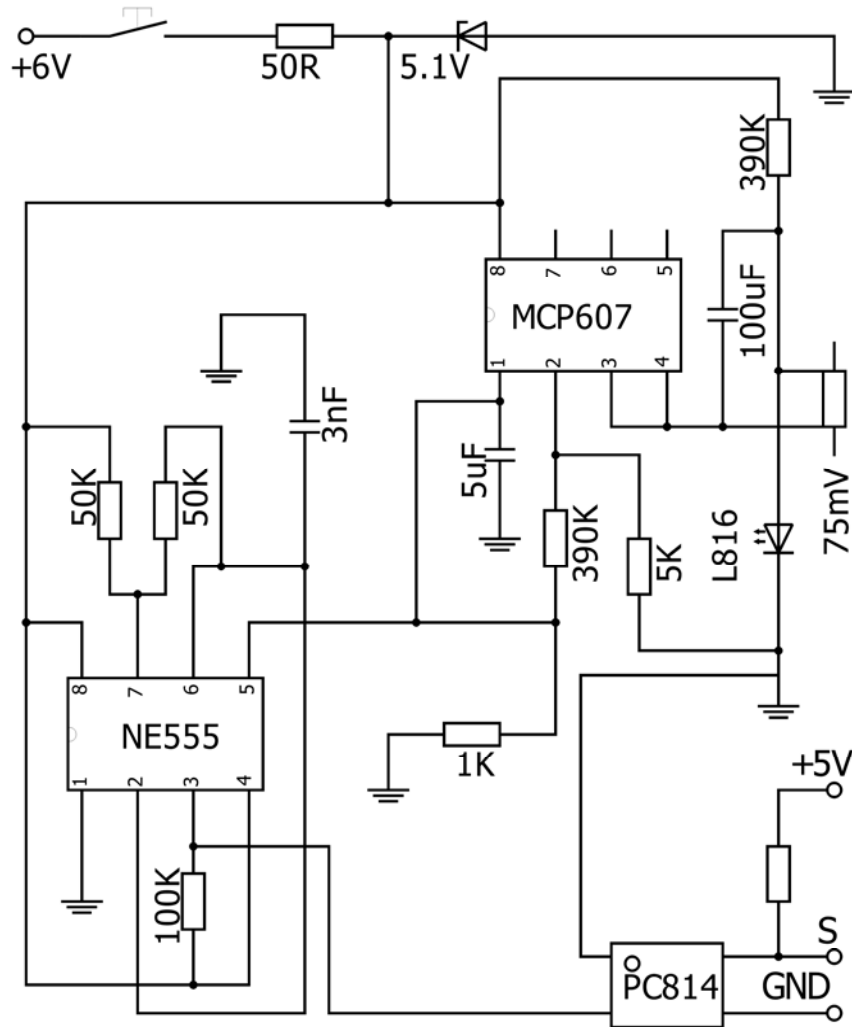


Рисунок 4.2 – Електрична схема датчика вимірювання струму

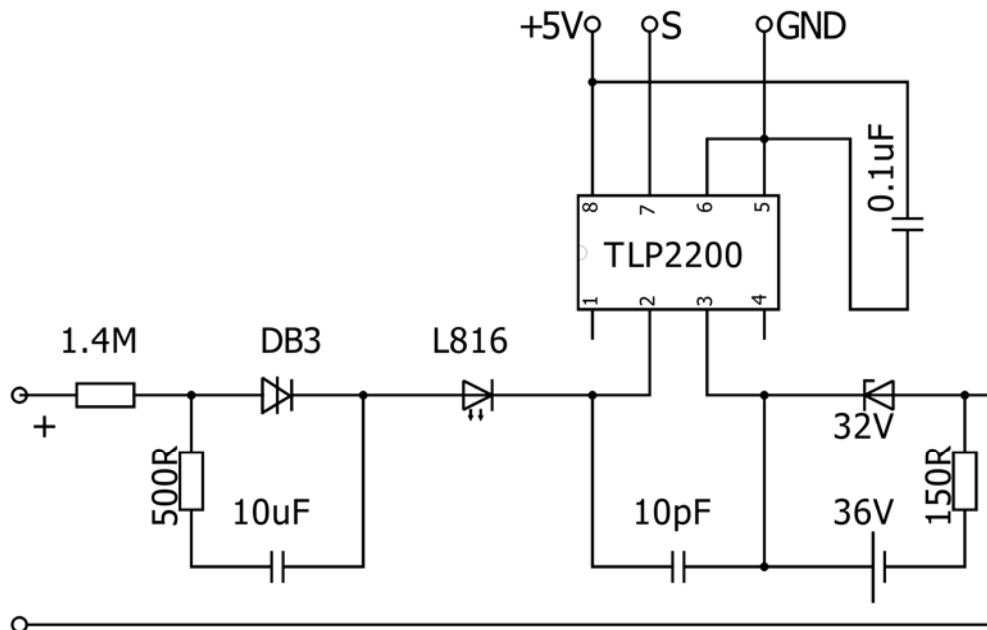


Рисунок 4.3 – Електрична схема датчика вимірювання напруги

Електрична схема працює таким чином. Вимірювальна напруга підводиться до діністора DB3 через струмообмежувальний резистор. Після зарядки конденсатора 10uF та підвищення напруги на діністорі до значення 32 В останній переходить у режим пробою. По закінченні розрядки конденсатора діністор закривається. Таким чином формується пилоподібний імпульс на оптроні з тригером TLP2200. Тригер формує прямокутний імпульс на виході. Блок живлення зі стабілізатором передбачений для розширення діапазону вимірювань від 0 В.

4.2 Визначення потужності локомотива

Визначення сили тяги локомотива є одним з найбільш вагомих факторів в системах, які визначають енергоефективні режими ведення.

Одним із способів визначення сили тяги F КМБ є розрахунок електричної потужності тягового електродвигуна з урахуванням його ККД $\eta_{\text{тед}}$ та ККД тягового редуктора $\eta_{\text{ред}}$.

$$F = 3,6 \cdot \frac{U_{\text{тед}} \cdot I_{\text{тед}} \cdot \eta_{\text{тед}} \cdot \eta_{\text{ред}}}{v} \quad (4.1)$$

Недолік цього методу в тому, що значення ККД та навантаженість КМБ локомотива відрізняються, що вносить похибку в розрахунки [126]. До того ж для отримання сили тяги необхідно відстежувати поточне значення швидкості v та враховувати нелінійні залежності $\eta_{\text{тед}}$ та $\eta_{\text{ред}}$.

У [3] запропоновано спосіб визначення сумарної сили тяги локомотива на підставі поточних значень напруги, струму та магнітного потоку. Але з урахуванням того, що визначення магнітної індукції, особливо в незамкнутому магнітному контурі, є недостатньо точним, то доцільно до запропонованого алгоритму [3] додати функцію струму збудження I_3 .

Визначення сили тяги КМБ у [127] виконується за формулою

$$F_{\text{КМБ}} = I_{\text{я}} \left(\frac{E}{n} \right) \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{тед}} \cdot \frac{\mu_{\text{р}}}{D_{\text{к}}} \cdot \frac{60}{\pi} \cdot 10^{-3} \quad (4.2)$$

де E/n – величина, пропорційна магнітному потоку двигуна, задана функцією струму збудження (рис. 4.4);

$I_{я}$ – стум, що проходить по обмотках якоря;

μ_p – передаточне відношення осьового редуктора;

D_k – діаметр колеса по колу катання.

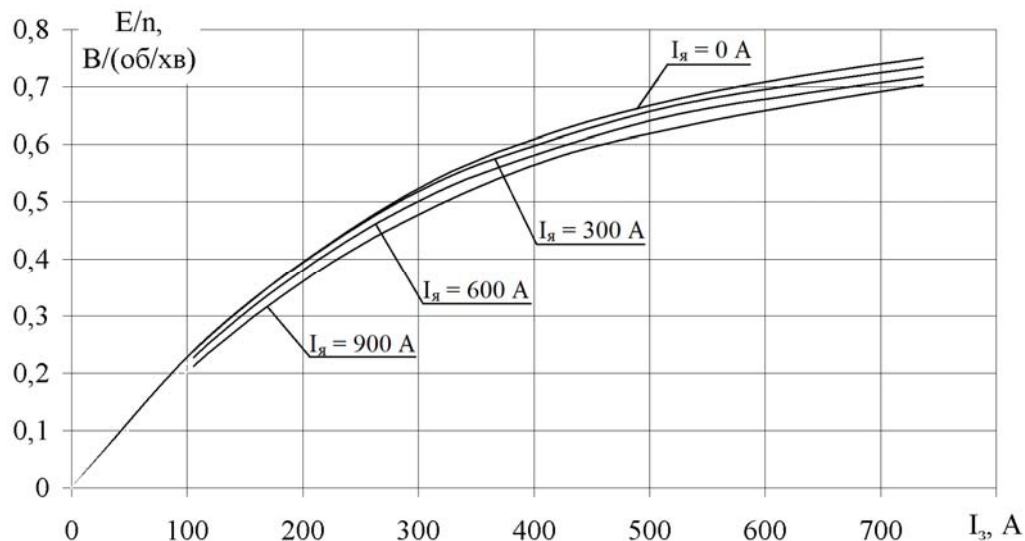


Рисунок 4.4 – Навантажувальні характеристики ТЕД типу ЭД-118А тепловоза серії 2ТЭ116 [127]

Сумарна сила тяги локомотива F визначається сумою сил тяги окремих МБ

$$F = \sum_{k=1}^m F_{кМБ_k}, \quad (4.3)$$

де m – кількість КМБ на локомотиві.

Цей метод враховує неточності налаштування ослаблення поля ТЕД та відхилень перехідного опору групових перемикачів. Він є достатньо точним, але виникає необхідність вимірювання струму якоря $I_{я}$ та струму збудження I_3 кожного електродвигуна з урахуванням діаметрів коліс по колу катання D_k .

Додатково цей метод дозволяє визначати швидкість руху локомотива на підставі вимірюваних електричних параметрів

$$v = 0,188 \cdot \frac{I_{\text{я}} \cdot R}{\left(\frac{E}{n}\right)} \cdot \frac{D_{\text{к}}}{i}, \quad (4.4)$$

де R – сумарний опір електричного кола якоря.

Вказаний метод вимірювання потужності локомотива, з врахуванням того, що датчики встановлюються окремо на кожен тяговий електродвигун, дозволяє визначати реалізовану потужність кожного колісно-моторного блока. Ці дані можна використовувати як діагностичні параметри технічного стану колісних пар, тягових редукторів та тягових електродвигунів, виходячи з розподілу потужності між окремими приводами. Впровадження сучасних систем бездротового зв'язку дає можливість централізованого моніторингу параметрів ТРС.

4.3 Призначення та опис основних модулів програмної частини

Програмним модулем називається програма або функціонально завершений фрагмент програми, призначений для зберігання, трансляції, об'єднання з іншими програмними модулями та завантаження в оперативну пам'ять [128].

Модуль є програмною одиницею для зберігання елементів, які можна використовувати в тих чи інших програмах. Такими елементами можуть бути типи (включаючи об'єкти), константи, змінні та підпрограми. Якщо все, що було написано в програмі, повністю входить у скомпільований файл програми, то з модуля в скомпільовану програму потрапляють тільки ті частини, які необхідні цій програмі. Тому модуль виступає як бібліотека, яку можна вживати в багатьох програмах, і кожна з них бере тільки те, що їй потрібно. Наявність модулів дозволяє програмувати та налагоджувати програму частинами, створювати бібліотеки підпрограм та даних, скористатися можливостями стандартних модулів, практично необмежено збільшувати кодову (що містить коди команд) частину програми.

У моделі визначено набір керуючих параметрів, за допомогою яких

визначається траєкторії руху поїзда. Набір керуючих параметрів, які використовуються в моделі, залежить від типу локомотива та відповідає його реальним органам керування. Для тепловозів з передачею постійного та змінно-постійного струму:

- режим руху (тяга, вибіг, реостатне або пневматичне гальмування);
- позиція контролера машиніста;
- позиція ослаблення поля в режимі тяги.

Крім керуючих, є параметри, що визначають траєкторію руху. Безпосередня зміна значень цих параметрів неможлива, але їх можна контролювати в процесі формування траєкторії. Як параметри траєкторії прийняті наступні:

- швидкість руху поїзда $v(s)$;
- сила тяги локомотива $F(s)$;
- струм двигуна $I_{med}(s)$;
- витрата палива $q(s)$;
- температура перегріву двигуна $\tau(s)$.

Параметри траєкторії являють собою функції від шляху й використовуються в моделі для накладення обмежень на значення керуючих параметрів. Програма визначення енергозощаджуючих режимів ведення складається з таких модулів.

Модуль «*energoeffect*» зберігає функціональні залежності раціонального керування тяговим рухомим складом для окремих фаз руху. Функції є окремими процедурними об'єктами, які позначаються:

- RAZGON – визначає позицію контролера машиніста під час рушання та розгону;
- DVIGENIE_POZIC – визначає позицію контролера машиніста під час руху з підтримуванням кінетичної енергії поїзда;
- DVIGENIE_SKOR – визначає рівномірні швидкості під час руху з підтримуванням кінетичної енергії поїзда;

- SKOR_VIBEG – визначає значення раціональних швидкостей, які доцільно реалізовувати в режимі вибігу;
- OGRANICH_SKOR – визначає допустимі швидкості руху по ділянці за умови розв’язання гальмівної задачі.

Приклад програмного коду DVIGENIE_POZIC модуля «*energoeffect*» наведений у дод. А.

Модуль «*profil*» зберігає значення ухилів та відповідних довжин ділянок у форматі

$$\begin{aligned} iuch &:= [-0.6, -1.7, 0.6, \dots, -1.30, -0.20]; \\ such &:= [0, 225, 425, 825, \dots, 157480, 157535]; \end{aligned}$$

а також інформацію про станції та постійні обмеження швидкості.

Модуль «*locomotiv*» зберігає характеристики локомотива.

Модуль «*usrednenie_uklonov*» виконує усереднення ухилів по довжині поїзда. Алгоритм роботи модуля відповідає формулі (2.12).

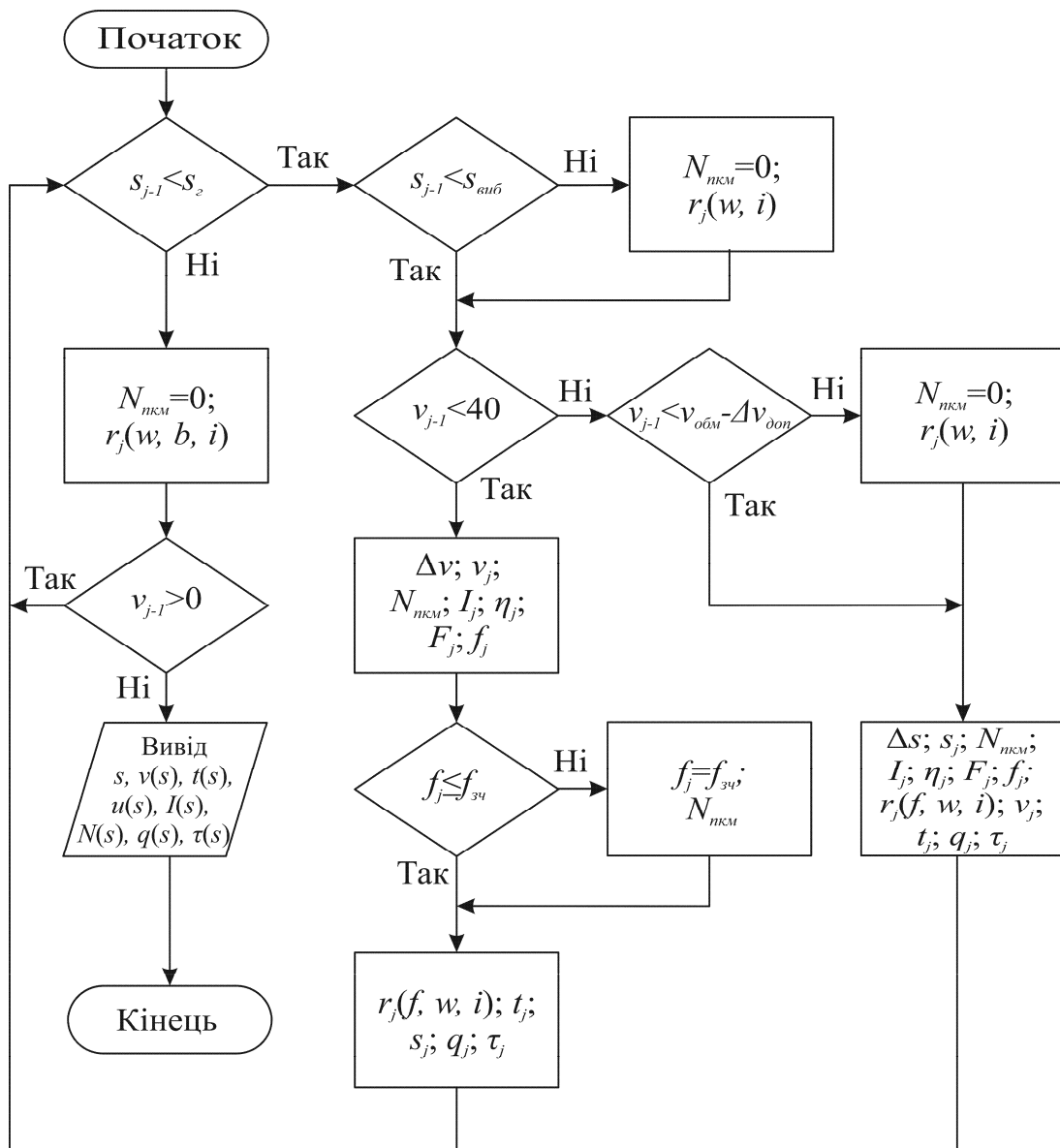
На остаточному етапі виконується побудова сплайна $\tilde{i} = f(s)$.

Модуль «*upravlenie*» та «*razgon*» виконує розрахунок та побудову раціонального керування та рівномірних швидкостей руху на підставі модуля «*energoeffect*» за алгоритмом

$$\begin{aligned} v_j^{\text{рівн}} &:= \text{DVIGENIE_SKOR}(Q, \tilde{i}(s_j)); \\ N_j^{\text{ПКМ}} &:= \text{DVIGENIE_POZIC}(Q, \tilde{i}(s_j)); \\ N_j^{\text{ПКМ}} &:= \text{RAZGON}(Q, \tilde{i}(s_j)). \end{aligned} \quad (4.5)$$

Розгін відбувається до моменту досягнення значення швидкості $v_j \geq v^{\text{рівн}}(s)$ або максимально допустимої [129].

Модуль «*dvigenie*» виконує розрахунок траєкторії руху поїзда на підставі п. 3.2.2 та модуля «*upravlenie*». Алгоритм роботи модуля наведений на блок-схемі (рис. 4.5). Він реалізований в програмному пакеті символічних обчислень «Maple» [130, 131].

Рисунок 4.5 – Блок-схема роботи модуля «*dvigienie*»

Висновки до розділу 4

1. Сформульовано вимоги до апаратно-програмного комплексу оперативного розрахунку раціональних режимів керування локомотивом та видачі режимних карт.

2. Розроблено апаратне забезпечення збирання та обробки тягових параметрів локомотива для визначення поточних даних про режим роботи та потужність тягового рухосого складу для можливості оперативного розрахунку раціонального режиму ведення.

3. Розроблено програмне забезпечення для визначення індивідуальних

раціональних режимів керування локомотивом, оптимізованих за критерієм мінімуму витрат енергоресурсів за умови виконання графіка руху.

4. Індивідуальні режимні карти раціонального керування локомотивом, які реалізовані в АПК, дозволяють отримати економію енергоресурсів, які витрачаються на тягу поїзда, а також підвищити рівень досвідченості машиністів.

4. Додатково АПК дозволяє розв'язувати такі задачі:

- визначати технічний стан тягового електричного та механічного обладнання на підставі розподілу потужності між окремими колісно-моторними блоками ТРС;
- дає можливість централізованого моніторингу параметрів ТРС за рахунок застосування систем бездротового зв'язку.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1 Випробування системи реєстрації параметрів локомотива

Експериментальні дослідження системи реєстрації тягових параметрів локомотива виконано на різних типах електродвигунів, а саме ЭД-118А, ЭД-105, ТЕ-006. Випробування проведено в лабораторії кафедри «Локомотиви» ДНУЗТ, тепловозоремонтному заводі ПАТ «ДТРЗ», локомотивному депо «Пологи» Придніпровської залізниці.

Для порівняння обрано методи визначення сили тяги:

- за електричною потужністю $U \cdot I \cdot \eta_{\text{ТЕД}}$;
- з урахуванням магнітного потоку основних полюсів Φ_3 ;
- за навантажувальними характеристиками $E / n = f(I_3)$.

Часова діаграма роботи тягового електродвигуна без навантаження при обмеженні потужності пусковим реостатом наведена на рис. 5.1.

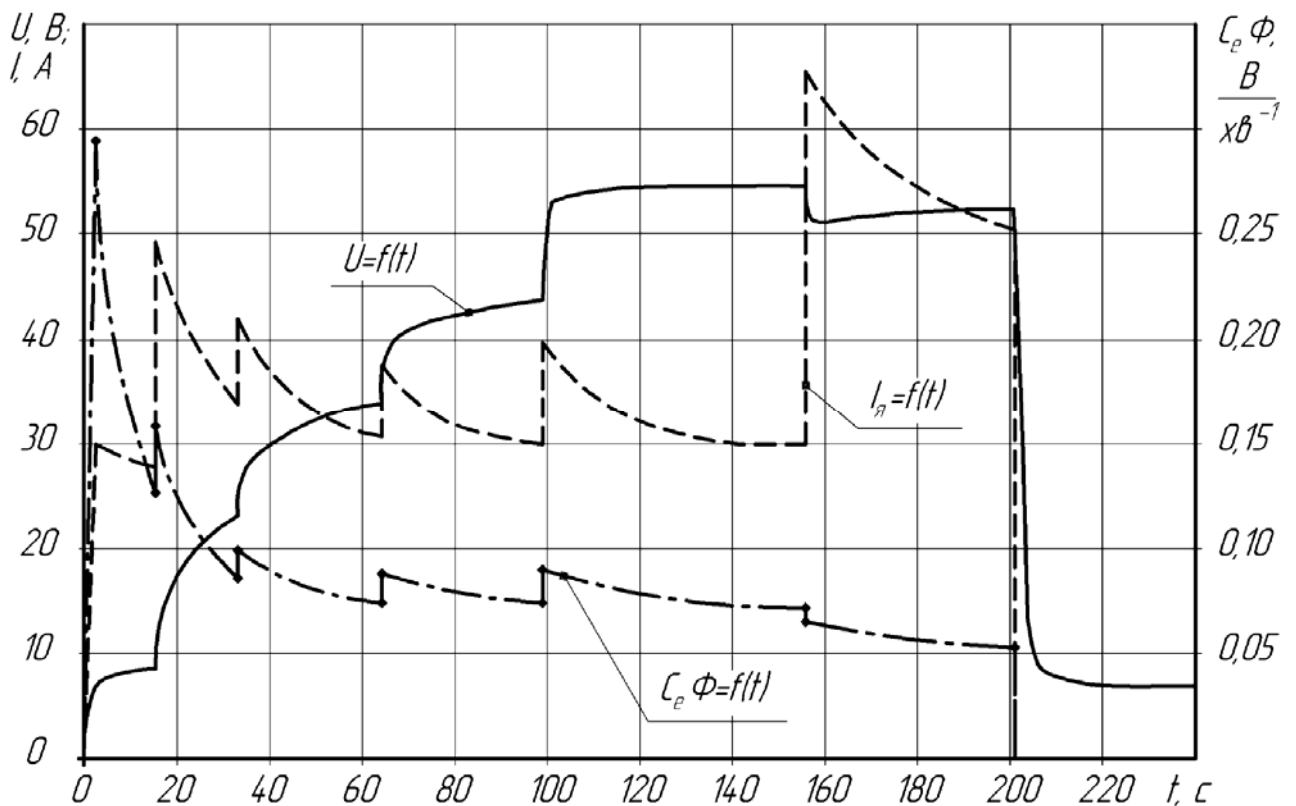


Рисунок 5.1 – Напруга, струм та магнітний потік ТЕД типу ЭД-105

Частота обертання $n_{\text{розр}}^{(1)} = f(t)$ та момент на валу якоря $M = f(t)$, визначені за формулами (5.1) та (5.2), наведено на рис. 5.2. Частота обертання $n_{\text{факт}} = f(t)$ є фактичною, визначена цифровим датчиком.

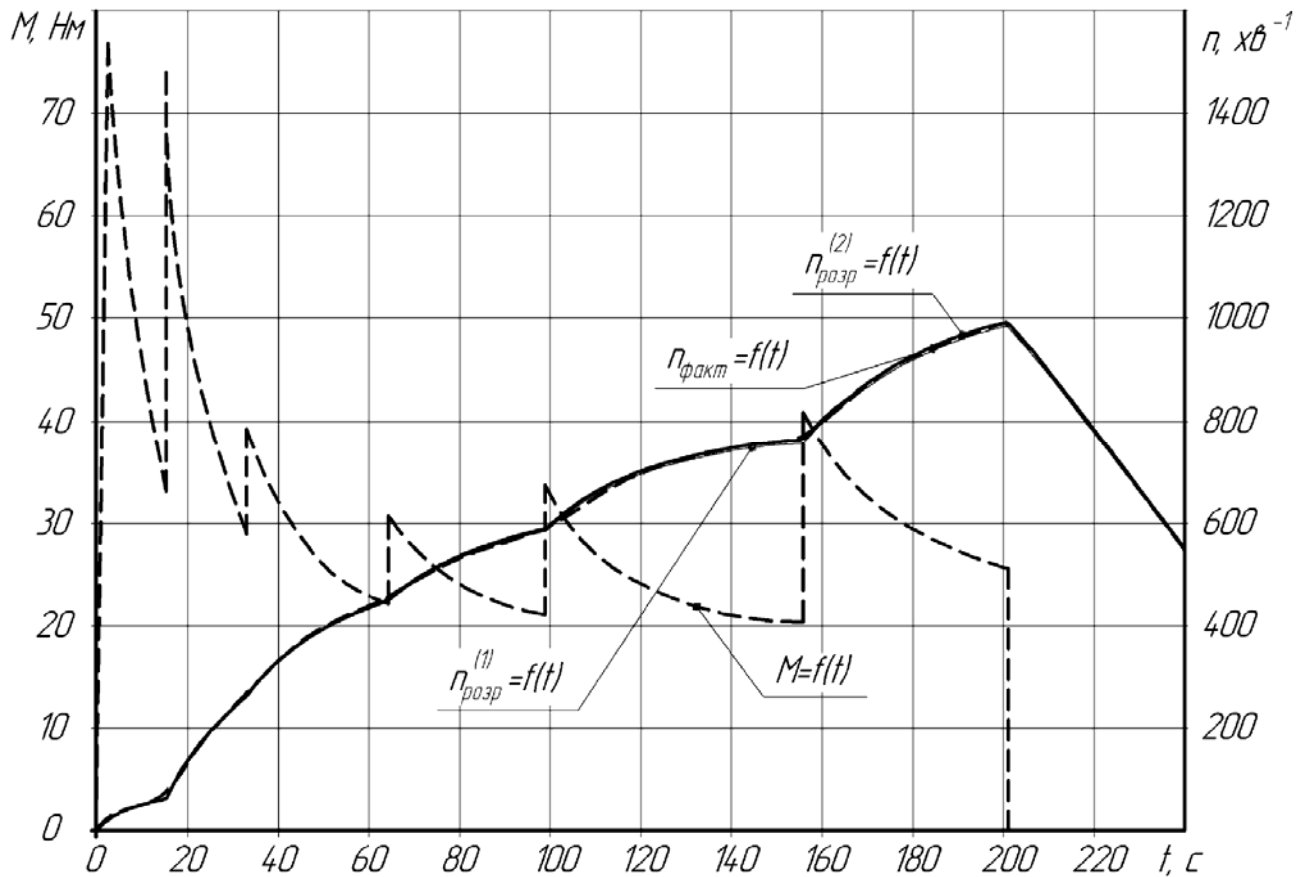


Рисунок 5.2 – Частота обертання та момент ТВД

$$M = C_M \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi_3, \quad (5.1)$$

де C_M – постійний коефіцієнт, який враховує кількість пар полюсів, кількість витків якоря та інші параметри цього електродвигуна.

$$n = \frac{E}{C_e \cdot \Phi_3}, \quad (5.2)$$

де C_e – постійний для цього електродвигуна коефіцієнт, що залежить від діаметра якоря, кількості провідників обмотки та інших конструктивних особливостей двигуна.

Залежність $n_{\text{розр}}^{(2)} = f(t)$ отримана за формулою (4.4) шляхом приведення до частоти обертання якоря.

З діаграми спостерігаємо незначні відхилення графіків частоти обертання, отриманих за різними методами.

Для визначення достовірності запропонованого алгоритму визначення сили тяги виконано порівняння електричної та механічної потужностей, у т. ч. з урахуванням навантажувальних характеристик (див. рис. 4.3). Визначено, що розбіжність значення електричної та механічної потужності КМБ має несталый характер та залежить від навантаження (рис. 5.3).

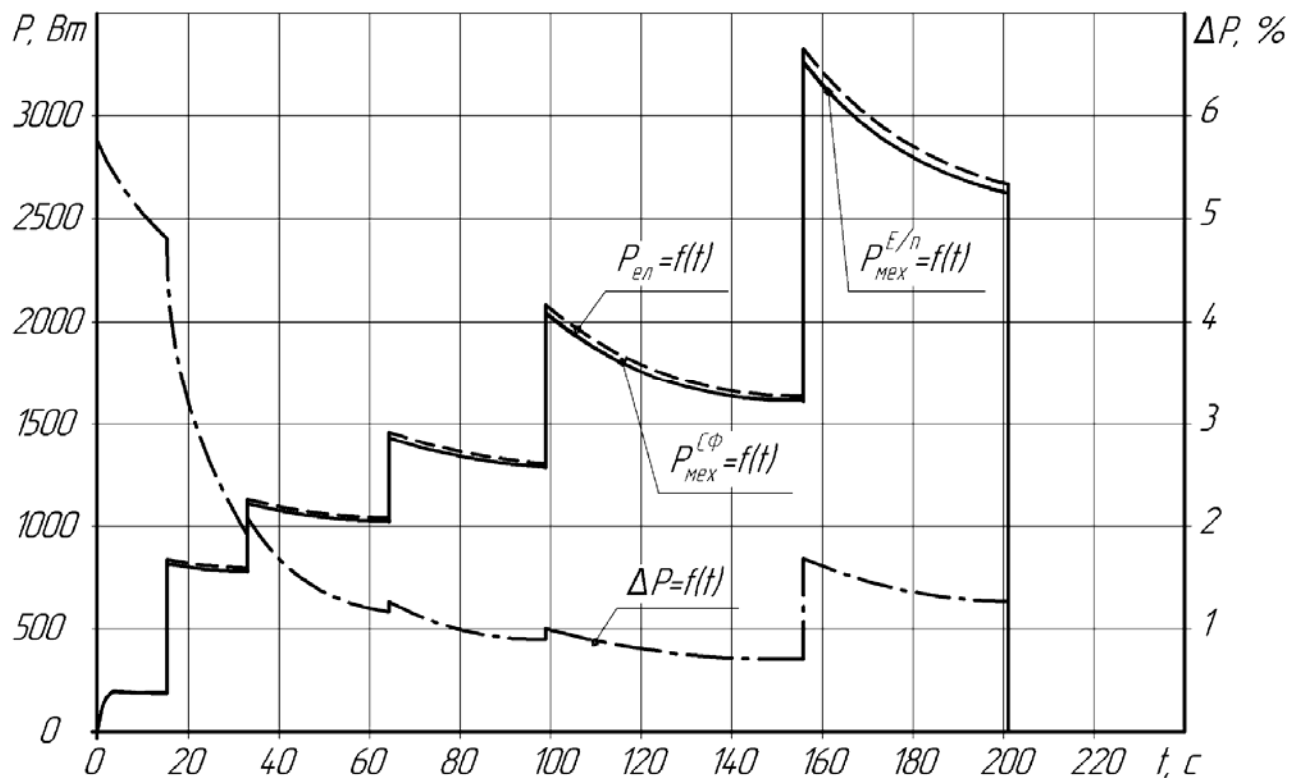


Рисунок 5.3 – Порівняння потужностей КМБ, визначених за різними методами

Функція дотичної сили тяги колісно-моторного блока (та локомотива) є лінійною залежністю обертового моменту на валу якоря ТЕД

$$F_{\text{д}} = \frac{2 \cdot \mu_{\text{р}} \cdot M_{\text{тед}}}{D_{\text{к}}} \cdot \eta_{\text{р}}, \quad (5.3)$$

тому при випробуванні системи реєстрації параметрів локомотива побудовано

залежності $M_{\text{тед}} = f(I_{\text{я}})$, розраховані за різними методами.

На рис. 5.4 наведено фактичні дані навантаження ТЕД. Для компенсації коливань вимірюваних параметрів X та гармонічних складових за період коливань T або при розрахунку постійної пульсуючої напруги доцільно розрахувати середньоквадратичне значення від миттєвого значення функції u [132]

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (5.4)$$

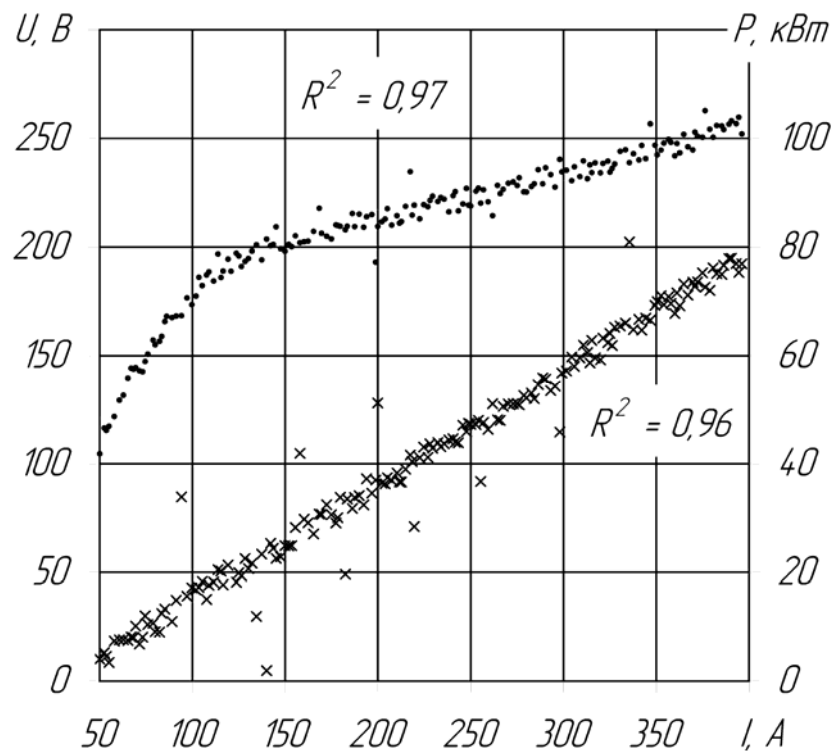


Рисунок 5.4 – Залежності напруги (•) та потужності (×) ТЕД типу ЭД-118А від струму якоря

Потужність ТЕД визначено за формулою

$$P_{\text{тед}} = U_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} \cdot \eta_{\text{тед}}(I_{\text{я}}). \quad (5.5)$$

Для порівняння розраховано обертовий момент на валу якоря за формулами

$$M^{(1)} = 9,554 \cdot \frac{P_{\text{ТЕД}}}{n_{\text{я}}} \quad (5.6)$$

та

$$M^{(2)} = I_{\text{я}} \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \left(\frac{E}{n} \right) \quad (5.7)$$

з урахуванням (4.2) та навантажувальних характеристик (див. рис. 4.4).
Результати наведено на рис. 5.5.

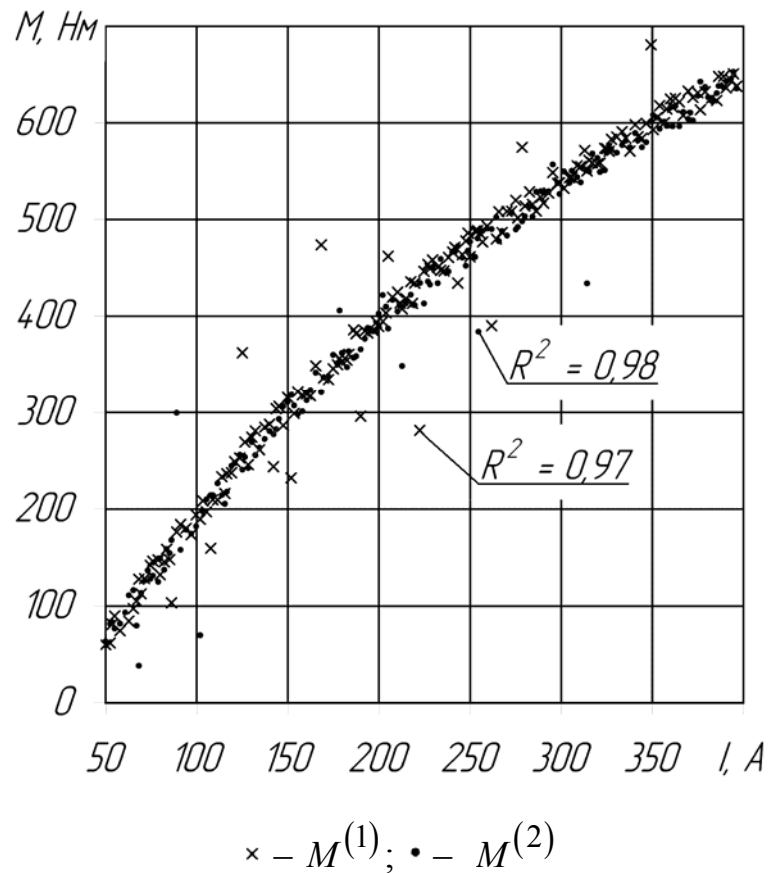


Рисунок 5.5 – Порівняння розрахунків моменту на валу ТЕД

Коефіцієнт детермінації R^2 поліноміальної функції другого степеня складає 0,98.

Оцінку похибки обчислення моменту на валу ТЕД можна провести інтегральним показником

$$\Delta = \frac{9,554 \cdot \int_{50}^{400} \frac{P_{\text{тед}}}{n_{\text{я}}} - \frac{30}{\pi} \cdot \int_{50}^{400} I_{\text{я}} \cdot \left(\frac{E}{n} \right)}{9,554 \cdot \int_{50}^{400} \frac{P_{\text{тед}}}{n_{\text{я}}}} \cdot 100; \quad (5.8)$$

$$\Delta = \frac{1,42844 \cdot 10^5 - 1,42109 \cdot 10^5}{1,42844 \cdot 10^5} \cdot 100 = 0,5 \%$$

Таким чином, можна стверджувати, що визначення сили тяги локомотива за алгоритмом, який враховує навантажувальні характеристики ТЕД з використанням запропонованих первинних датчиків, можна застосовувати в системі реєстрації параметрів локомотива.

5.2 Апробація програмної частини комплексу індивідуальних раціональних режимів ведення

У процесі розробки алгоритмів та програм визначення раціональних режимів ведення поїздів виникає необхідність в оцінці ефективності запропонованих заходів. Виконати таку оцінку до створення дослідного зразка можливо тільки шляхом аналізу, що базується на тягових розрахунках [133].

Ефективність раціонального режиму керування локомотивом визначається тією економією енергоресурсів на тягу поїздів, яка може бути досягнута під час прямування по ділянці [39]. Енергетичну ефективність оцінюють шляхом порівняння фактичних витрат палива тепловозів з розрахунковими. Мірою оцінки цього стану є кількісна ознака, яка відображає обсяг зекономленого або перевитраченого палива за поїздку. Оцінити ефективність режиму можна проведенням дослідних поїздок, порівнянням статистичних даних форм ТУ-3, 4526L, розрахункових норм витрати палива, порівнянням розрахункових траєкторій зі швидкістемірною стрічкою та з іншими траєкторіями, отриманими за існуючими алгоритмами визначення раціональних режимів ведення.

5.2.1 Порівняння індивідуальних раціональних режимів ведення з результатами тягових розрахунків, отриманими за методом Лінеца–Лебедєва

Тягові розрахунки, виконані для конкретної ділянки, дають обмежене уявлення про ефективність запропонованого алгоритму раціонального керування для всієї мережі залізниць, що є досить трудомістким. Тому може бути прийнятий спосіб тягових розрахунків за типовими профілями відповідно до класифікації [134, 133]. Класифікація, запропонована в [134], враховуючи переваги та недоліки раніше розроблених систем, дозволяє на підставі досить простої методики відносити будь-яку реальну ділянку залізниці до одного з чотирьох типів профілю. Завдяки цьому обмежується обсяг тягових розрахунків, а їх результати з достатньою точністю відповідають розрахункам для реальної ділянки. Для порівняння обрано профіль 3-ї складності з розрахунковим підйомом $i = 9\%$ у прямому та зворотному напрямках (рис. 5.6) [133].

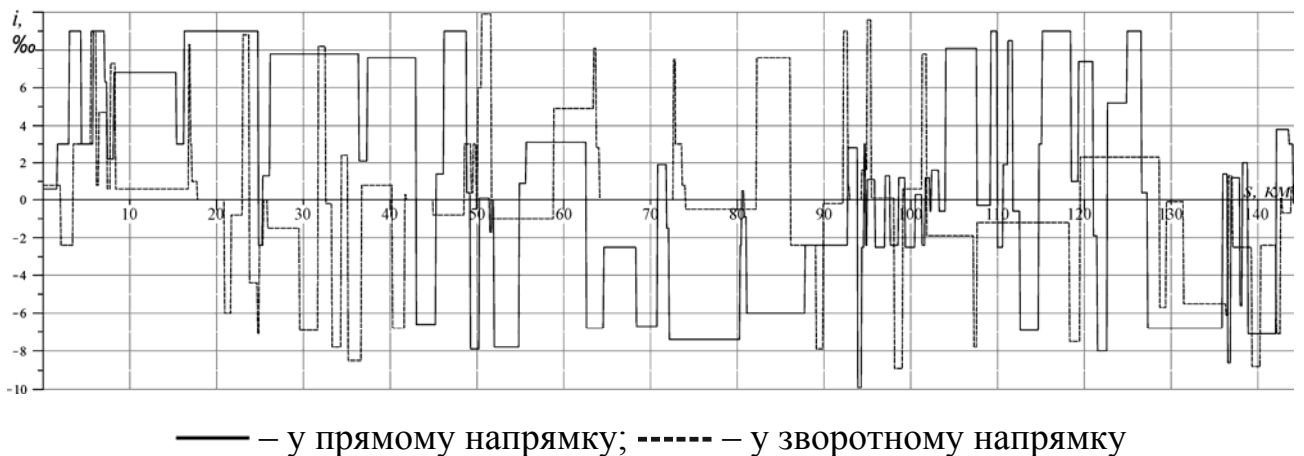


Рисунок 5.6 – Узагальнений профіль 3-ї складності [133]

Результати моделювання для поїзда зі складом масою $Q = 3000$ т та кількістю осей $n = 148$ з локомотивом серії 2ТЭ116 зводимо до табл. 5.1.

Для можливості порівняння результатів тягових розрахунків, отриманих за вказаними методами, з урахуванням того, що отриманий час ходу поїзда та витрата палива не збігаються, вводимо узагальнюючий коефіцієнт k_{qt}^m , який

Таблиця 5.1

Порівняння результатів тягових розрахунків

Метод тягових розрахунків	Напрямок	Довжина ділянки, км	Маса поїзда, т	Витрата палива, кг	Час ходу поїзда, хв	k_{qt} , 10^3 кг·хв	Різниця Δqt , %
Метод Ліпеца–Лебедева	прям.	144,1	3000	1815	121	219,6	3,2
	зв.			1260	98	123,5	
Метод індивідуальних раціональних режимів	прям.			1540	138	212,5	2,2
	зв.			1088	111	120,8	

враховує витрату палива q та час ходу поїзда t

$$k_{qt}^m = \sum q \cdot \sum t, \quad (5.9)$$

де m – метод тягових розрахунків.

Для методу Ліпеца–Лебедева $k_{qt}^{ЛЛ}$ складає

$$k_{qt}^{ЛЛ} = 1815 \cdot 121 = 219,6 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{хв}.$$

Оцінку ефективності тягових розрахунків за різними методами виконуємо за формулою [39]

$$\Delta qt = \frac{k_{qt}^m - k_{qt}^{m'}}{k_{qt}^m} \cdot 100, \quad (5.10)$$

де m , m' – відповідні методи тягових розрахунків.

Порівняння результатів тягових розрахунків за методом Ліпеца–Лебедева та індивідуальних раціональних режимів у прямому напрямку руху

$$\Delta qt^{пр} = \frac{219,6 - 212,5}{219,6} \cdot 100 = 3,2 \%$$

та зворотному напрямку руху

$$\Delta qt^{зв} = \frac{123,5 - 120,8}{123,5} \cdot 100 = 2,2 \%$$

5.2.2 Порівняння індивідуальних раціональних режимів ведення з результатами фактичних поїздок

Порівняння розрахункових даних з фактичними результатами поїздок дають більш повне уявлення про ефективність методу індивідуальних раціональних режимів. Під час виконання держбюджетної теми «Виконання аналізу можливих причин відхилення витрат дизельного палива від існуючих норм та підготовка рекомендацій зі зменшення витрат палива» (№ДР 0115U007071) було проведено аналіз фактичних даних за даними довідок 4526L результатів 15 поїздок у прямому напрямку та 10 поїздок у зворотному напрямку на ділянці Миколаїв–Долинське (довжина ділянки 157,5 км). До аналізу входять такі показники: повна витрата палива, витрата палива на вимірювач, $\text{кг}/(10^4 \text{т} \cdot \text{км})$, час ходу поїзда (табл. 5.2, 5.3).

Для відповідних мас складу та напрямку руху за методом індивідуальних раціональних режимів виконано тягові розрахунки з визначенням енергозощаджуючого режиму керування. Результати зводимо до табл. 5.2, 5.3, рис. 5.7–5.10.

У роботах [135, 136, 137] вказано, що основними причинами коливання фактичного значення дільничної швидкості руху та часу ходу вантажних поїздів є відправлення на ділянку не за нормативним графіком руху. Це викликає зупинки поїздів під обгонами та схрещеннями й різниці в масі поїздів, що зумовлює невиконання перегінного часу ходу.

Основними причинами коливання часу ходу вантажного поїзда є відмови пристроїв колії, енергопостачання, СЦБ, поїзних локомотивів та вагонів, їх часткові відмови, що виражаються в обмеженні швидкості, виконання робіт з ремонту та обслуговування інфраструктури, помилки персоналу, несанкціоноване втручання в роботу залізничного транспорту, надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру, пропуск пасажирських поїздів,

Таблиця 5.2

Порівняння розрахункових даних з фактичними поїздками на ділянці
Миколаїв – Долинське в прямому напрямку

Маса поїзда брутто, т	Витрата палива, кг		Витрата палива на вимірювач, кг/(10 ⁴ т·км)		Час ходу поїзда, хв		Різниця Δq, %
	факт.	розр.	факт.	розр.	факт.	розр.	
1254	1321	1167	67	59	268	129	11,7
1257	1437	1261	73	64	185	129	12,2
1869	1538	1408	52	48	240	131	8,5
1898	1496	1381	50	46	213	131	7,7
1948	1761	1578	57	51	177	131	10,4
1954	1498	1392	49	45	227	131	7,1
2208	1401	1370	40	39	239	131	2,2
2335	1832	1681	50	46	187	132	8,3
2427	1687	1585	44	41	184	132	6,0
2683	1630	1557	39	37	218	133	4,5
2913	1668	1617	36	35	194	135	3,0
3928	1960	1911	32	31	186	133	2,5
5013	2063	2013	26	25	200	163	2,4
5017	2270	2222	29	28	239	149	2,1
5070	2503	2300	31	29	258	149	8,1

Таблиця 5.3

Порівняння розрахункових даних з фактичними поїздками на ділянці
Миколаїв – Долинське у зворотному напрямку

Маса поїзда брутто, т	Витрата палива, кг		Витрата палива на вимірювач, кг/(10 ⁴ т·км)		Час ходу поїзда, хв		Різниця Δq, %
	факт.	розр.	факт.	розр.	факт.	розр.	
2010	828	757	26	24	180	129	8,6
3887	1245	1152	20	19	205	135	7,5
5437	887	850	10	10	202	135	4,2
5462	910	885	11	10	176	143	2,7
5540	966	931	11	11	170	145	3,7
5790	1047	1022	11	11	242	142	2,5
5797	986	948	11	10	177	147	3,9
6027	991	964	10	10	170	149	2,7
6034	1357	1288	14	14	190	149	5,1
6532	1221	1187	12	12	205	154	2,8

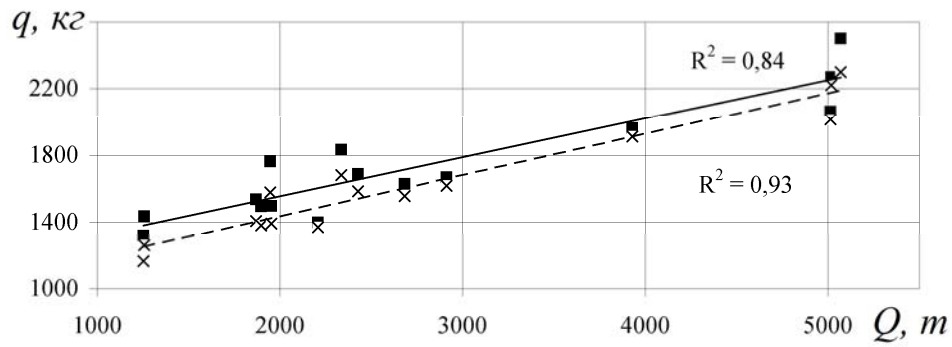


Рисунок 5.7 – Залежність витрати палива від маси складу в прямому напрямку*

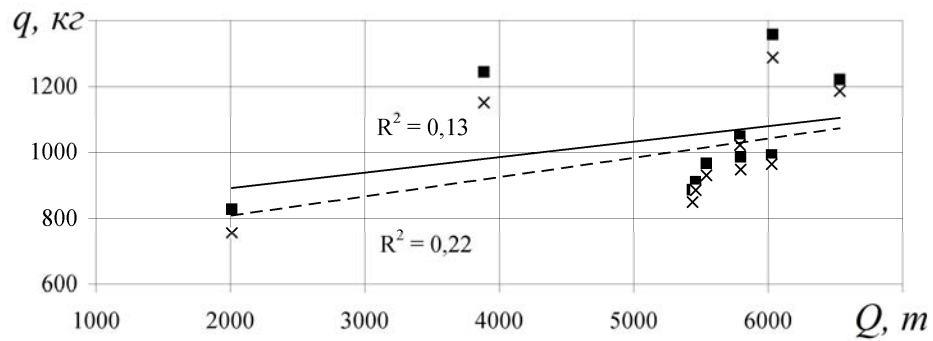


Рисунок 5.8 – Залежність витрати палива від маси складу у зворотному напрямку*

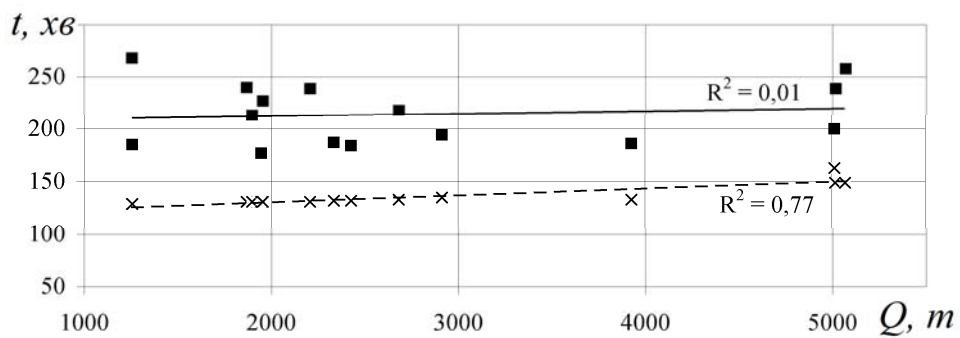


Рисунок 5.9 – Залежність часу ходу від маси складу в прямому напрямку*

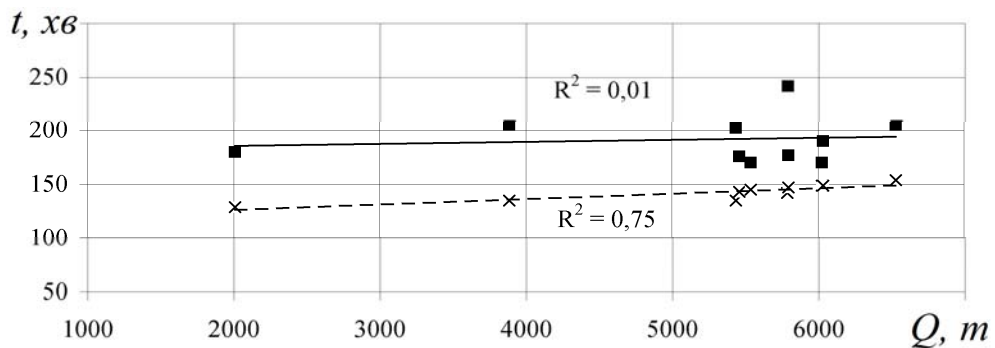


Рисунок 5.10 – Залежність часу ходу від маси складу у зворотному напрямку*

* ———— – фактичні дані; - - - - - – розрахункові дані

а також вторинні затримки через затримки інших потягів у потоці. Тому час ходу поїзда визначається як випадкова величина.

Узагальнюючи вищевикладене та з врахуванням того, що розрахований час для всіх поїздок менший за фактичний, порівняння даних виконуємо за витратою палива

$$\Delta q = \frac{q^{\Phi} - q^P}{q^{\Phi}} \cdot 100. \quad (5.11)$$

Результати зводимо відповідно до табл. 5.2 та 5.3.

Таким чином, ефективність методу індивідуальних раціональних режимів для ділянки Миколаїв–Долинське довжиною 157,5 км в прямому та зворотному напрямках складає 2-12 % порівняно з реальними поїздками.

5.2.3 Порівняння індивідуальних раціональних режимів ведення з даними швидкостемірної стрічки

Накладання розрахованої траєкторії на швидкостемірну стрічку дозволяє проаналізувати зміну швидкості та режиму керування з траєкторією реального поїзда, його перехідними процесами, динамікою прискорення та сповільнення й іншими факторами.

За досліджувану, обрано ділянку Пологи–Волноваха довжиною 134,4 км. Для порівняння обрано швидкостемірні стрічки поїздів масою $Q^{PP} = 4977$ т та $Q^{3B} = 4993$ т. Витрата дизельного палива обраних поїздок є мінімальною порівняно з поїздами схожої маси.

Спрямлений профіль ділянки в прямому та зворотному напрямках наведений в дод. Ж.

Розрахунки траєкторій руху виконано при фіксованому часі ходу поїзда (відповідає вказаним поїздкам) та нефіксованому часі ходу поїзда за алгоритмами енергозощаджуючого керування. Результати розрахунків наведено в дод. З та в табл. 5.5.

Оцінку ефективності розрахованого раціонального режиму керування з

Таблиця 5.5

Порівняння результатів тягових розрахунків

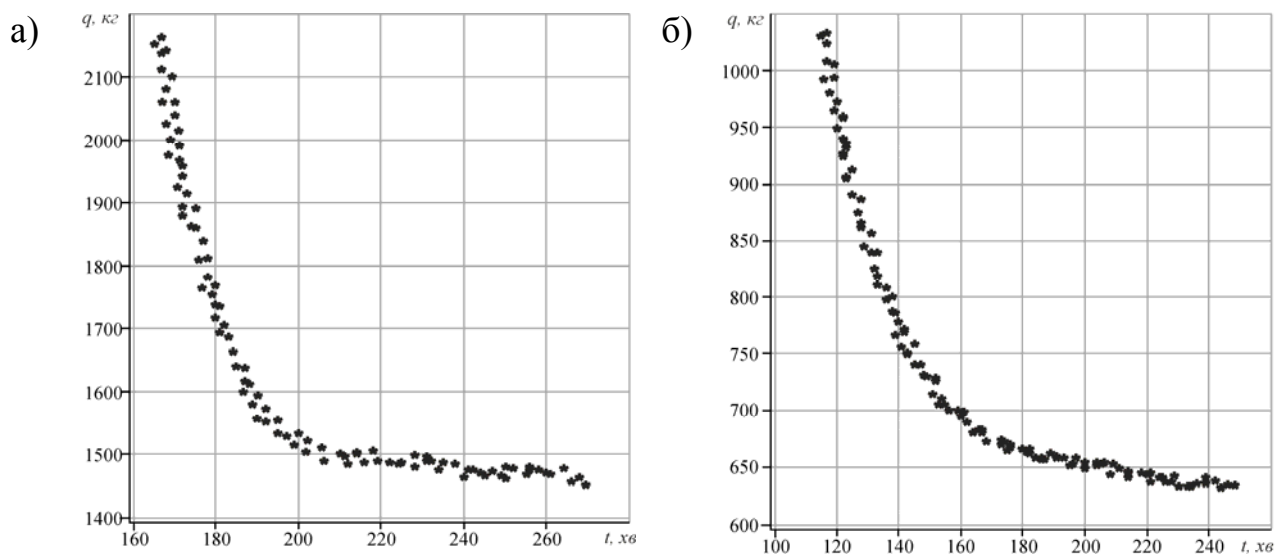
Результати поїздки	Напрямок руху	Довжина ділянки, км	Маса поїзда, т	Витрата палива, кг	Час ходу поїзда, хв	Різниця Δq , %
Фактична	пр.	134,4	4977	1710	228	2,6
	зв.		4933	770	174	
Метод індивідуальних раціональних режимів	пр.		4977	1665	228	2,2
	зв.		4933	753	174	

урахуванням того, що час ходу поїзда є фіксованим, можна виконати за формулою (5.11):

$$\Delta q^{\text{пр}} = \frac{1710 - 1665}{1710} \cdot 100 = 2,6 \%;$$

$$\Delta q^{\text{зв}} = \frac{770 - 753}{770} \cdot 100 = 2,2 \%.$$

Розрахована поїздка передбачає проміжні зупинки в обох напрямках руху. Якщо відправлення поїзда узгодити з наявним графіковим часом для ліквідування вимушених зупинок, то можна отримати такі залежності витрати палива від часу ходу поїзда (рис. 5.15).



а – прямий напрям, $Q^{\text{пр}} = 4977$ т; б – зворотний напрям, $Q^{\text{зв}} = 4993$ т

Рисунок 5.15 – Залежності витрати палива від часу ходу поїзда ділянки

Пологи–Волноваха

Отже, можна зробити такі висновки. Порівняння методу індивідуальних раціональних режимів з різними методами тягових розрахунків, у т.ч. тими, що враховують оптимізацію режимів ведення, та реальними поїздками дає такі результати підвищення енергоефективності:

- метод Ліпеца–Лебедева – 2,2-3,2 %;
- фактичні поїздки з нефіксованим часом ходу поїзда – 2-12 %;
- фактичні поїздки з фіксованим часом ходу поїзда – 2,2-2,6 %.

До того ж застосування методу індивідуальних раціональних режимів дозволяє отримувати раціональне керування з коригуванням траєкторії під графіковий час руху або час вільного перегону.

Висновки до розділу 5

1. Проведено експериментальні дослідження апаратної частини комплексу розрахунку раціональних режимів керування локомотивом. Результати досліджень свідчать про можливість застосування системи реєстрації тягових параметрів локомотива в бортових системах. Інтегральне значення похибки вимірювань складає $\Delta = 0,5\%$.

2. Сформульовано вимоги до виконання експериментальних досліджень програмної частини комплексу індивідуальних раціональних режимів ведення поїздів для оцінки точності та адекватності імітаційної моделі раціонального керування локомотивом, а також оцінки економії паливо-енергетичних ресурсів.

3. Виконано оцінку ефективності індивідуальних раціональних режимів порівнянням з результатами тягових розрахунків, отриманими за методом Ліпеца–Лебедева, результатами фактичних поїздок, даними швидкостемірної стрічки. Одержані результати свідчать про те, що за рахунок використання індивідуальних раціональних режимів ведення поїзда, обчислених за вищенаведеним алгоритмом, економія енергоресурсів може складати від 2 до 12 %.

6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ВЕДЕННЯ

Економічна ефективність – це результат, який можна отримати, вимірявши показники стосовно загальних витрат та використаних ресурсів.

Для оцінки ефективності заходів важливим є визначення обґрунтованої ціни продукту, яка забезпечить ефективність впроваджуваного проекту. Як основні показники для оцінки економічної ефективності рекомендуються:

- чиста приведена вартість;
- індекс рентабельності;
- термін окупності інвестицій;
- середня норма прибутку на інвестиції.

Крім зазначеної комерційної ефективності оцінюються також громадська і бюджетна ефективність, ступінь урахування інтересів різних учасників проекту [138].

Для розрахунку показників економічної ефективності необхідно чітко визначити, які ефекти від впровадження можуть дати рух грошових потоків від операційної та інвестиційної діяльності. Це вимагає розробки алгоритмів і методів їх визначення, які повинні поєднувати точність і економічність реалізації.

Вибір основних критеріїв для оцінки тих чи інших показників залежить від сфери застосування об'єкта. При розрахунках ефективності повинні бути відображені тільки ті види доходів та витрат, які виникають у результаті реалізації проекту.

Специфіка залізничного транспорту полягає, зокрема, у тому, що транспортний виробничий процес не здійснюється на певній обмеженій території, а може виконуватися в межах декількох залізниць. Таким чином, для обґрунтування величини зміни експлуатаційних витрат недостатньо лише показників середньої собівартості перевезень вантажів або пасажирів. Необхідні дані про собівартість перевезень за напрямками та ділянкам з різними видами

тяги, за окремими категоріями поїздів, видами сполучень тощо [139].

Згідно з рекомендаціями [140, 141], розрахунки економічної ефективності повинні проводитися на прикладі конкретних умов експлуатації об'єкта, де нова технологія вже впроваджена або де планується її впровадження (депо, ділянка обертання локомотивів тощо).

Скорочення витрат на тягу поїздів при впровадженні апаратно-програмного комплексу індивідуальних раціональних режимів ведення викликани позитивним ефектом від впровадження – зниженням витрат енергоресурсів за рахунок енергоефективного ведення поїзда локомотивними бригадами.

Для достовірної й точної оцінки зниження витрат енергоресурсів на тягу поїздів необхідно визначити основні чинники, що впливають як на перевитрату енергоресурсів, так і на величину економії.

До числа основних факторів, що визначають перевитрату енергоресурсів, належать:

- по локомотивному господарству – низький рівень технічного стану локомотивів (несправності паливної апаратури, якість технічного обслуговування та поточних ремонтів), недоліки нормування та обліку витрати палива, недостатня кваліфікація локомотивних бригад;

- по господарству руху – формування неповновагових поїздів, стоянки біля вхідних сигналів станції, стоянки на проміжних станціях, пропуск пасажирських поїздів, очікування відправлення, нерівномірність руху, неповне використання пропускнуої та провізної здатності, недостатня взаємодія між диспетчерами та локомотивними бригадами тощо;

- по вагонному господарству – очікування локомотивними бригадами перевірки гальм поїзда, неякісний огляд вагонів;

- по вантажному господарству – невідповідність маси вантажу, що перевозиться, зазначеного в накладній, і фактичного, залишки вантажів у вагонах;

- по ремонтних заводах – недостатня якість заводського ремонту

ЛОКОМОТИВІВ.

Основними факторами, що сприяють економії паливно-енергетичних ресурсів, є:

- по локомотивному господарству – гарний технічний стан локомотивів (модернізація конструкцій та вузлів, підвищення якості ремонту), організаційні заходи (велике поширення передового досвіду, регулярне проведення технічного навчання, ефективна система стимулювання за економію енергоресурсів), уміла робота локомотивних бригад (підвищення кваліфікації, регулювання технічної швидкості, застосування рекуперації та ін.);
- по господарству руху – формування поїздів підвищеної маси;
- по вантажному господарству – щільне завантаження вантажів.

Локомотивна бригада – це остання та найважливіша ланка великого ланцюга працівників, від яких залежить витрата паливно-енергетичних ресурсів на тягу поїздів. Вона підбиває остаточний підсумок роботи всіх господарств, фіксує його у своєму маршруті машиніста [142, 143].

Велика частина ресурсозберігаючих проектів спрямована на поліпшення якісних показників використання рухомого складу. Це вимагає застосовувати вартісну оцінку їх зміни. Облік вартісної оцінки якісних показників в операційних потоках дозволить вийти на більш точні показники економічної ефективності.

Розглянемо основні показники оцінки ефективності для системи індивідуальних раціональних режимів ведення поїздів.

Чиста приведена вартість (Net Present Value, NPV) – це різниця між величиною грошового потоку, дисконтованого за прийнятної ставки дохідності, та сумою витрат на впровадження продукту. Для розрахунку NPV проекту необхідно визначити ставку дисконту, використати її для дисконтування потоків витрат та прибутку й підсумувати дисконтовані доходи й витрати. В економічному аналізі ставка дисконту являє собою закладену вартість капіталу, тобто прибуток, який міг би бути одержаний при інвестуванні найприбутковіших альтернативних проектів.

Якщо значення NPV додатне, то проект можна рекомендувати для фінансування; у випадку якщо NPV дорівнює нулю, то надходжень від проекту вистачить лише для відновлення вкладеного капіталу. Якщо NPV менша нуля – проект є не вигідним.

Розрахунок NPV виконується таким чином:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{P_t}{\alpha_t} - IC, \quad (6.1)$$

де P_t – річні грошові надходження впродовж n років;

IC – стартові грошові вклади;

α_t – коефіцієнт при постійній нормі дисконту;

n – тривалість (строк життя) проекту;

$$\alpha_t = (1 + r)^{-t}, \quad (6.2)$$

де r – значення ставки дисконту.

Тривалість експлуатаційного терміну обмежена матеріальним забезпеченням (апаратною частиною комплексу) та складає $n = 5$ років. Для підтримування експлуатаційної надійності та обслуговування комплексу, у т. ч. з врахуванням заробітної плати обслуговуючого персоналу, річні грошові витрати складають 30 тис. грн, при тому річні грошові надходження $P_t = 370$ тис. грн. Ставка дисконту на 2016 рік становить 22 % [144]. Стартові грошові вкладення складають суму капітальних витрат $IC = 169$ тис грн.

Капітальні витрати на впровадження апаратно-програмного комплексу індивідуальних раціональних режимів ведення поїздів, тис. грн становлять:

Розробка методики розрахунку раціональних режимів ведення поїзда	50
Розробка алгоритмів та програмного забезпечення комплексу індивідуальних раціональних режимів ведення поїздів.....	50
Розробка апаратної частини комплексу індивідуальних раціональних режимів ведення поїздів	20

Експериментальні дослідження.....	7
Придбання персонального комп'ютера та друкарського обладнання.....	32
Інші витрати.....	10
Загалом.....	169

Розрахунок річних дисконтованих надходжень виконуємо у вигляді табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Розрахунок чистої приведеної вартості

Рік	Річні грошові надходження P_t , тис. грн	Коефіцієнт при постійній нормі дисконту α_t	Річні грошові надходження з врахуванням дисконту	Стартові грошові вклади IC , тис. грн
1	370	0,820	303	169
2	370	0,672	249	
3	370	0,551	204	
4	370	0,451	167	
5	370	0,370	137	
Сума	1850	-	1060	169

$$NPV = 1060 - 169 = 891 \text{ тис. грн.}$$

Під індексом рентабельності (PI) розуміють величину, рівну відношенню наведеної вартості очікуваних потоків грошей від реалізації проекту до початкової вартості інвестицій. На відміну від показника NPV, показник PI – це відносна величина, яка характеризує рівень прибутковості інвестицій і визначається за формулою:

$$PI = \frac{1}{IC} \cdot \sum_{t=1}^n \frac{P_t}{\alpha_t}; \quad (6.3)$$

$$PI = \frac{1}{169} \cdot 1060 = 6,27 \text{ тис. грн.}$$

Термін окупності інвестицій (Payback Period, PP) – це тривалість часу,

впродовж якого недисконтовані прогностні надходження грошових коштів перевищують недисконтовану суму інвестицій, тобто це кількість років, необхідних для відшкодування інвестицій

Показник терміну окупності інвестицій можна визначити за такою формулою:

$$PP = \frac{IC}{\bar{D}}, \quad (6.4)$$

де \bar{D} – середньорічна сума грошового потоку.

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n P_t. \quad (6.5)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{5} \cdot 1850 = 370 \text{ тис. грн};$$

$$PP = \frac{169}{370} = 0,46 \text{ року.}$$

Середня норма прибутку на інвестиції (Accounting Rate of Return, *ARR*) – це відношення середньої величини прибутку до середньої величини інвестицій. При цьому розрахунок може здійснюватися на основі прибутку (доходу) без урахування виплати податків і відсотків за кредит або прибутки (доходу) після виплати податку, але до виплати відсотків за кредит.

Величина інвестицій, по відношенню до якої знаходять рентабельність, визначається як середня величина між вартістю активів на початок і кінець розрахункового періоду. Формула розрахунку норми прибутку на інвестиції (*ARR*) має такий вигляд:

$$ARR = \frac{2 \cdot P_t \cdot (1 - k)}{IC + RV} \cdot 100, \quad (6.6)$$

де k – ставка оподаткування, $k = 20 \%$;

RV – залишкова або ліквідаційна вартість проекту, $RV = 52$ тис. грн.

$$ARR = \frac{2 \cdot 370 \cdot (1 - 0,2)}{169 + 52} \cdot 100 = 268 \% .$$

Основними недоліками цього методу є те, що, по-перше, важко визначити, який рік реалізації інвестиційного проекту слід узяти для розрахунків норми прибутку, а по-друге, він не враховує вплив часу на грошові потоки – інвестований капітал порівнюється з прибутком, який отримує підприємство через декілька років [145].

Висновки до розділу 6

1. Виконані техніко-економічні розрахунки підтвердили ефективність впровадження апаратно-програмного комплексу розрахунку індивідуальних раціональних режимів ведення поїзда. Розрахунковий термін окупності апаратно-програмного комплексу склав шість місяців.

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 енергозаощаджуючих режимів ведення поїздів показує, що перспективними є алгоритми та методики визначення енергозаощаджуючих 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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 енергозощаджуючих 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.
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.
4. Кислий Д. М. Визначення енергозощаджуючих 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.
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.
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. Красовский Н. Н. Теория управления движением / Н. Н. Красовский. – Москва: Наука, 1968. – 475 с.
8. Шаракшанэ А. С. Испытания сложных систем / А. С. Шаракшанэ, И. Г. Железнов. – Москва: Высш. шк., 1974. – 209 с.
9. Тэлер Дж. Анализ и расчет нелинейных систем автоматического управления / Дж. Тэлер, М. Пестель. – Москва: Энергия, 1964. – 488 с.
10. Краснов М. Л. Вариационное исчисление, задачи и упражнения / М. Л. Краснов, Г. И. Макаренко, А. И. Киселев. – Москва: Наука, 1973. – 190 с.
11. Старинова О. Л. Классическое вариационное исчисление: учебное пособие / О. Л. Старинова; Самарский государственный аэрокосмический университет. – Самара, 2002. – 90 с.
12. Милютин А. А. Принцип максимума в оптимальном управлении / А. А. Милютин, А. В. Дмитрук, Н. П. Осмоловский. – Москва: Изд-во ЦПИ при мехмате МГУ, 2004. – 169 с.
13. Интрилигатор М. Математические методы оптимизации и экономическая теория / М. Интрилигатор. – Москва: Прогресс, 1975. – 606 с.
14. Коробов П. Н. Математическое программирование и моделирование экономических процессов / П. Н. Коробов. – Санкт-Петербург: ДНК, 2010. – 363 с.
15. Машунин Ю. К. Методы и модели векторной оптимизации / Ю. К. Машунин. – М.: Наука, 1986. – 145 с.
16. Osyzka. Multicriteria optimization for engineering design // Design Optimization. – New York: Academic Press. – P. 193-227.
17. Тракимус Ю. В. Основы вариационного исчисления в примерах и задачах: учеб. пособие / Ю. В. Тракимус. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 48 с.
18. Гернет Н. Об основной простейшей задаче вариационного исчисления / Н. Гернет. – Санкт-Петербург: Тип. Ю. Н. Эрлих, 1913. – 155 с.
19. Петров Ю. П. Очерки истории теории управления. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2012. – 272 с.

20. Беллман Р. Динамическое программирование и уравнения в частных производных / Р. Беллман, Э. Энджел; пер. с англ. С. П. Чеботарёва; под ред. А. М. Летова. – Москва: Изд-во «МИР», 1974. – 205 с.
21. Беллман Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – Москва: Иностран. лит-ра, 1960. – 400 с.
22. Беллман Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус; под ред. А. А. Первозванского. – Москва: Наука. Главная ред. физ.-мат. лит-ры, 1965. – 460 с.
23. Понтрягин Л. С. Принцип максимума в оптимальном управлении / Л. С. Понтрягин. – Москва: Наука, 1989. – 62 с.
24. Понтрягин Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – 4-е изд. – Москва: Наука, 1983. – 392 с.
25. Костромин А. М. Оптимизация режимов управления и траекторий движения поездов на участке / А. М. Костромин, С. Я. Френкель // Оптимизация управления и совершенствование узлов локомотивов: межвуз. сб. науч. ст. / БелИИЖТ. – 1978. – С.52–58.
26. Костромин А. М. Об интегрировании уравнений движения поезда и расчете оптимальной траектории / А. М. Костромин // Тр. БелИИЖТа. – 1974. – Вып. 132. – С. 3–11.
27. Петров Ю. П. Очерки истории теории управления / Ю. П. Петров. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2012. – 72 с.
28. Петров Ю. П. Оптимальное управление движением транспортных средств / Ю. П. Петров. – Ленинград: Энергия, 1969. – 96 с.
29. Петров Ю. П. Оптимальное управление электроприводом / Ю. П. Петров. – Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1961. – 187 с.
30. Петров Ю. П. Вариационные методы теории оптимального управления / Ю. П. Петров. – Ленинград: Энергия, 1977. – 280 с.

31. Босов А. А. Некоторые вопросы методики оптимальных тяговых расчетов на ЭЦВМ / А. А. Босов // Вопросы усовершенствования устройств электрической тяги. – 1968. – Вып. 77. – С. 108–119.
32. Босов А. А. Параметризация в задачах векторной оптимизации / А. А. Босов, Г. К. Гетьман // Транспорт: зб. наук. пр. ДДТУЗТ. – 2000. – Вып. 5. – С. 62–65.
33. Боднарь Б. Е. О несравнимых вариантах в задаче тяговых расчетов / Б. Е. Боднарь, А. А. Босов, Д. В. Бобырь // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2006. – Вып. 12. – С. 57–59.
34. Бобырь Д. В. Усовершенствование режимов ведения грузового поезда с электрической тягой: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Бобырь Дмитрий Валерьевич. – Днепропетровск, 2007. – 190 с.
35. Капіца М. І. Автоматизація розв'язання рівняння руху поїзда при виконанні тягових розрахунків / М. І. Капіца, Д. В. Бобирь // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – 2012. – Вып. 132. – С. 96–104.
36. Ерофеев Е. В. Выбор оптимального режима ведения поезда на АЦВМ с применением метода динамического программирования / Е. В. Ерофеев // Тр. МИИТ. – 1967. – Вып. 228. – С. 16–28.
37. Ерофеев Е. В. Исследование оптимальных программ движения поезда при вариациях исходных параметров / Е. В. Ерофеев // Тр. МИИТ. – 1968. – Вып. 315. – С. 66–72.
38. Ерофеев Е. В. Определение оптимальных режимов движения поезда при заданном времени хода / Е. В. Ерофеев // Вестн. ВНИИЖТ. – 1969. – № 1. – С. 54–57.
39. Оптимизация управления движением поездов: учебн. пособие / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелёшин, Л. М. Чинь; под ред. д-ра техн. наук, проф. Л. А. Баранова. – Москва: МИИТ, 2011. – 164 с.
40. Головичер Я. М. Аналитический метод расчета оптимального управления движением поезда / Я. М. Головичер // Изв. вузов, сер. «Электромеханика». – 1986. – № 3. – С. 58–66.

41. Система автоведения пассажирского поезда / Е. В. Ерофеев, Н. И. Куренков, Я. М. Головичер, Д. М. Шмидрик // Автоматика, телемеханика и связь. – 1976. – № 8. – С. 11–13.

42. Система автоведения пассажирского поезда на базе микроЭВМ / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Л. Л. Ефимов, А. А. Силаев // Автоматика, телемеханика и связь. – 1984. – № 8. – С. 11–13.

43. Гирсанов И. В. Лекции по математической теории экстремальных задач / И. В. Гирсанов. – Москва: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1970. – 122 с.

44. Комплексная система автоматического управления движением поездов метрополитена / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов и др. // Автоматизация управления движением поездов метрополитена: сб. науч. тр. / ВНИИЖТ. – Москва, 1987. – С. 81–90.

45. Баранов Л. А. Оптимальное управление поездом метрополитена по критерию минимума энергозатрат / Л. А. Баранов, И. С. Мелёшин, Л. М. Чинь // Электротехника. – 2011. – № 8. – С. 9–14.

46. Почаевец Э. С. Расчет оптимальных программ автоматического ведения поезда: автореф. дис. ...канд. техн. наук / Э. С. Почаевец; МИИТ. – Москва, 1967. – 16 с.

47. Гетьман Г. К. Математическая модель поезда для производства тяговых расчетов в задачах выбора параметров тяговых средств / Г. К. Гетьман // Транспорт: зб. наук. пр. ДДТУЗТ. – 1999. – Вип. 1. – С. 75–79.

48. Скалозуб В. В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии / В. В. Скалозуб // Транспорт: зб. наук. пр. – 2002. – Вип. 12. – С. 158–167.

49. Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов / Е. П. Блохин, А. Н. Пшинько, Г. В. Евдомаха и др. // Залізн. трансп. України. – 2001. – № 6. – С. 19–23.

50. Блохин Е. П. Выбор режимов ведения поездов как стохастическая задача векторной оптимизации / Е. П. Блохин, В. В. Скалозуб // Транспорт: зб. наук. пр. ДДТУЗТ. – 2001. – Вип. 7. – С. 28–31.

51. Модель оптимального регулятора для управления движением пассажирских поездов / Е. П. Блохин, Г. В. Евдомах, В. В. Скалозуб, В. И. Дробаха // Транспорт: зб. наук. пр. ДДТУЗТ. – 2002. – Вип. 10. – С. 58–65.

52. Режимы ведения пассажирских поездов с учетом случайного напряжения в тяговой сети и переменных тарифов оплаты электроэнергии / Г. В. Евдомах, Ю. Н. Ивченко, В. В. Скалозуб и др. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2004. – Вип. 3. – С. 65–73.

53. Жуковский Н. Е. Полное собрание сочинений: в 16 т. / Н. Е. Жуковский. – Москва: Ленинград: ОНТИ НКТП СССР, Гл. ред. авиац. лит-ры, 1935–1937. – Т. 8: Теория упругости. Железные дороги. Автомобили / под ред. А. П. Котельникова. – 1937. – 291 с.

54. Garg V. K. Dynamics of railway vehicle systems / V. K. Garg, R. V. Dukkipati. – Toronto: Academic press, 1984. – 422 p.

55. К вопросу о математическом описании процессов, происходящих при переходных режимах движения поездов с зазорами в упряжи / В. А. Лазарян, Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Л. В. Белик // Тр. ДИИТа. – Москва: Транспорт, 1971. – Вып. 103. – С. 18–28.

56. Лазарян В. А. О математическом моделировании движения поезда по переломам продольного профиля / В. А. Лазарян, Е. П. Блохин // Тр. МИИТ. – Москва: МИИТ, 1974. – Вып. 444. – С. 83–123.

57. Рудяков З. З. Оптимальные режимы вождения поездов / З. З. Рудяков, Г. П. Лютенко, Г. З. Рудяков // Совершенствование локомотивов и вагонов: тр. ДИИТа. – Днепропетровск, 1969. – Вып. 85. – С. 3–10.

58. Сокол Э. Н. Сходы с рельсов и столкновения подвижного состава (Судебная экспертиза. Элементы теории и практики) / Э. Н. Сокол. – Киев: Транспорт України, 2004. – 368 с.

59. Пушкин В. Н. Железнодорожная психология / В. Н. Пушкин, Л. С. Нерсеян. – Москва: Транспорт, 1972. – 238 с.

60. Смирнов Б. А., Долгополова Є. В. Психологія діяльності в екстремальних ситуаціях / Б. А. Смирнов, Є. В. Долгополова. – Харків: Гуманітарний Центр, 2007, – 276 с.
61. Горкин А. П. Техника: энциклопедия / А. П. Горкин – Москва: Росмэн. 2006. – 488 с.
62. Белкин Р. С. Криминалистическая энциклопедия / Р. С. Белкин. – 2-е изд. – Москва: Мегатрон XXI, 2000. – 334 с.
63. Вибрации в технике: справочник: в 6-ти т. / В. Н. Челомей – Москва: Машиностроение, 1981. – Т. 6. Защита от вибрации и ударов / К. В. Фролова. – 456 с.
64. Гребенюк П. Т. Тяговые расчеты / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, А. И. Скворцова. – Москва: Транспорт, 1987. – 271 с.
65. Сокол Э. Н. Определение остановочного пути железнодорожного поезда / Э. Н. Сокол // Залізн. Трансп. України. – 2001. – № 2. – С. 23–25.
66. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва: Транспорт, 1985. – 287 с.
67. Мышкис А. Д. Элементы теории математических моделей / А. Д. Мышкис. – Изд. 3-е, испр. – Москва: КомКнига, 2007. – 192 с.
68. Кудрявцев В. А. Управление движением на железнодорожном транспорте: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / В. А. Кудрявцев. – Москва: Маршрут, 2003. – 200 с.
69. Подвижной состав и тяга поездов / А. П. Третьяков; В. В. Деев, А. А. Перова и др.; под ред. В. В. Деева, Н. А. Фуфрянского. – Москва: Транспорт, 1979. – 368 с.
70. Журавлев В. Ф. Основы теоретической механики / В. Ф. Журавлев. – Москва: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2001. – 320 с.
71. Эрдеди А. А. Техническая механика: Теоретическая механика. Сопротивление материалов. Учеб. для машиностр. спец. техникумов / А. А. Эрдеди, Ю. А. Медведев, Н. А. Эрдеди. – 3 изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк., 1991. – 304 с.

72. Элементарный учебник физики / под ред. Г. С. Ландсберга. – Т. 1. Механика. Теплота. Молекулярная физика. – Москва: Наука, 1985. – 616 с.
73. Деев, В. В. Тяга поездов: учеб. пособие для вузов / В. В. Деев, Г. А. Ильин, Г. С. Афонин; под ред. В. В. Деева. – Москва: Транспорт, 1987. – 264 с.
74. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. Е. Розенфельд, И. И. Исаев, Н. Н. Сидоров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Транспорт, 1983. – 328 с.
75. Ерофеев, Е. В. Принципы построения системы автоведения поездов метрополитена и пассажирских поездов при электрической тяге: дис. ...д-ра техн. наук. – Москва: МИИТ, 1985. – 395 с.
76. Новицкий П. В. Оцінка похибок вимірювань / П. В. Новицкий, Е. Н. Зограф. – Ленинград: Енергія, 1983. – 380 с.
77. Чемес Є. О. Електротехнічні пристрої радіоелектронних засобів: монографія / Є. О. Чемес, Ю. С. Ямпольський. – Одеса: Бахва, 2014. – 563 с.
78. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Москва: Наука, 1972. – 768 с.
79. Курант Р. Что такое математика? Элементарный очерк идей и методов / Р. Курант, Г. Роббинс; пер. с англ. под ред. А. Н. Колмогорова. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: МЦНМО, 2001. – 568 с.
80. Бельков В. Н. Автоматизированное проектирование технических систем: учеб. пособие / В. Н. Бельков, В. Л. Ланшаков. – Москва: Академия естествознания, 2009. – 143 с.
81. Босов А. А. Векторная оптимизация по двум показателям / А. А. Босов, Г. Н. Кодола, Л. Н. Савченко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – № 17. – С. 134–138.
82. Мямлин В. В. Обоснование алгоритма решения задачи векторной оптимизации по двум показателям при выборе гибкой технологии ремонта вагонов / В. В. Мямлин, А. А. Босов, С. В. Мямлин // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 36. – С. 54–57.

83. Квасов Б. И. Методы изометрической аппроксимации сплайнами / Б. И. Квасов. – Москва: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2006. – 360 с.
84. Кирьянов Д. В. Вычислительная физика / Д. В. Кирьянов, К. Н. Кирьянова. – Москва: Полибук Мультимедиа, 2006. – 352 с.
85. Цветков И. А. Построение оптимальных схем гидроприводов кранов на основе методов математической логики. / И. А. Цветков // Науч. тр. / ВНИИстройдормаш. – 1984. – Вып. 101. Исследования и разработка кранов. – С. 54–59.
86. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем / А. А. Воронов. – 2-е изд., перераб. – Москва: Энергия, 1980. – 312 с.
87. Тепловоз 2ТЭ116 / С. П. Филонов, А.И. Гибалов, Е. А. Никитин и др. – 3-е изд., перераб и доп. – Москва: Транспорт, 1996. – 334 с.
88. Цифровой безконтактный тахометричный блок: патент на полезную модель / Сердюк В. Н., Кислий Д. М., Вабілев Ю. Р., Ращупкін Т. В.; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. - $\text{U}2010\ 15625$; Заявл. 24.12.2010; Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12. - Введ. с 25.06.2011 по 25.06.2017. - 4 с.
89. Спосіб визначення потужності дизеля: патент на полезную 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. - $\text{U}2009\ 00082$; Заявл. 05.01.2009; Опубл. 25.06.2009, Бюл. № 12. - Введ. с 25.06.2009 по 25.06.2015. - 6 с.
90. Спосіб визначення потужності дизеля: патент на полезную 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. - $\text{U}2010\ 02337$; Заявл. 02.03.2010; Опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19. - Введ. с 11.10.2010 по 11.10.2016. - 7 с.
91. Довбня Н. П. Уточнения величин приведенных коэффициентов трения в цапфах подшипников скольжения и цилиндрическом желобе /

Н. П. Довбня, Л. Н. Бондаренко, Д. В. Бобырь, Д. Н. Кислый // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – Хмельницький: Хмельницький державний університет, 2013. – №1. – С. 47-50.

92. Балагуров В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов / В. А. Балагуров. – Москва: Высш. шк., 1982. – 272 с.

93. Каган А. В. Математическое моделирование в электромеханике. В 2-х ч. Ч. 2: Письменные лекции / А. В. Каган. – Санкт-Петербург: СЗТУ, 2002. – 73 с.

94. Москатов Е. А. Электронная техника. Начало / Е. А. Москатов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Таганрог, 2010. – 204 с.

95. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-генераторам / под ред. А. И. Тищенко. – Москва: Транспорт, 1976. – 432 с.

96. Носко В. П. Эконометрика для начинающих / В. П. Носко. – Москва: Изд-во Ин-та экономики переходного периода, 2000. – 255 с.

97. Тепловозные дизели типа Д49 / Е. А. Никитин, В. М. Ширяев, В. Г. Быков и др.; под ред. Е. А. Никитина. – Москва: Транспорт, 1982. – 255 с.

98. Боднар Б. Є. Система енергооптимального ведення приміського електропоїзда / Б. Є. Боднар, Д. В. Бобир, В. С. Любка, Д. М. Кислий // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 71 Международной научно-практической конференции. – Днепропетровск, 2011 – С. 41.

99. 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.

100. Вождение поездов: Пособие машинисту / Р. Г. Черепашенец, В. А. Бирюков, В. Т. Понкрашов, А. Н. Судаловский; под ред. Р. Г. Черепашенца. – Москва: Транспорт, 1994. – 304 с.

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

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

103. 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.

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

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

106. 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.

107. Гилев В. Г. Исследование алгебраических функций без использования производной / В. Г. Гилев. – Москва: Илекса, 2012. – 162 с.

108. Половко А. М. Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации / А. М. Половко, П. Н. Бутусов. – Санкт-Петербург: БВХ-Петербург, 2004. – 320 с.
109. Трауб Дж. Итерационные методы решения уравнений: пер. с англ. / Дж. Трауб. – Москва: Мир, 1985. – 264 с.
110. Traub J. F. Iterative methods for the solution of equations / J. F. Traub. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1964. – 310 p.
111. Аладьев В. З. Программирование и разработка приложений в Maple: монография / В. З. Аладьев, В. К. Бойко, Е. А. Ровба. – Гродно: ГрГУ; Таллинн: Межд. Акад. Ноосферы, Балт. отд., 2007. – 456 с.
112. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: учебник для вузов / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. А. Аржанников [и др.] ; под ред. В. А. Гапановича. – Москва: Изд. Дом МИСиС, 2012. – 620 с.
113. Capara A. Solution of the Train Platform Problem / A. Capara, I. Galli, P. Toth // *Transportation Science*. – 2011. – 45 (2). – P. 246–257.
114. Wong K. K. Coast control for mass rapid transit railways with searching methods / K. K. Wong and T. K. Ho // *IEEE Proceedings-Electric Power Applications*. – 2004. – Vol. 151. – P. 365.
115. Юренко К. И. Совершенствование бортовых систем управления локомотивов на базе технических средств тренажеро-моделирующих комплексов / К. И. Юренко, Е. Г. Шепилова, И. А. Гречук // *Электронный научно-инновационный журнал Инженерный вестник Дона [Электронный ресурс]*. – 2014. – Т. 29. – Вып. 2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2452>
116. Перевезенцев Е. А. Составы ведут «Автомашинисты» / Е. А. Перевезенцев, А. И. Шемановский // *Локомотив-информ / Укр. госуд. акад. ж.-д. трансп.* – 2005. – Вып. 6. – С. 15–17.
117. Пясик М. Системы автоматического ведения поезда / М. Пясик, Е. Толстов, И. Случак // *Современные технологии автоматизации*. – 2000. – Вып. 4. – С. 60–69.

118. Системы автоведения, регистрации параметров движения и работы тягового подвижного состава. Обзорное пособие. – Москва: ООО «АВП Технология», 2011. – 96 с.

119. Висин Н. Г. Результаты исследований по повышению надежности работы системы автоматического управления в режимах тяги и рекуперативно-реостатного торможения на электропоездах ЭР2Т / Н. Г. Висин, Б. Т. Власенко, С. А. Соколов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 17. – С. 55–58.

120. Теория передачи сигналов: учеб. для вузов / А. Г. Зюко, Д. Д. Кловский, М. В. Назаров, Л. М. Финк. – Москва: Связь, 1980. – 288 с.

121. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети / В. Столлингс. – Москва: Изд. дом "Вильямс", 2003. – 640 с.

122. 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.

123. 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 Міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ, 2014 – С. 17.

124. 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. - ¹u2010 14880; Заявл. 13.12.2010; Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12. - Введ. с 25.06.2011 по 25.06.2017. - 4 с.

125. Электрические и магнитные измерения. Общий курс: учеб. пособие для вузов / В. О. Арутюнов. – Ленинград: Москва: ОНТИ. Гл. ред. энерг. лит-ры, 1937. – 668 с.

126. Бобринский С. В. Анализ влияния разницы диаметров бандажей колесных пар на разброс токов в параллельных цепях тяговых электродвигателей и на надежность локомотива / С. В. Бобринский // Транспорт Урала. – 2009. – № 4(23). – С. 50–52.

127. Колесник И. К. Электропередачи тепловозов на переменном постоянном токе / И. К. Колесник, Т. Ф. Кузнецов. – Москва: Транспорт, 1978. – 149 с.

128. ГОСТ 19781-90. Обеспечение систем обработки информации программное. Термины и определения. – Москва: Изд-во стандартов, 1990. – 20 с.

129. 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.

130. 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.

131. 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.

132. Саблин О. И. Система электрической тяги постоянного тока – система непостоянного тока / О. И. Саблин // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 14. – С. 67–71.

133. Некрасов О. А. Режимы работы магистральных электровозов / О. А. Некрасов. – Москва: Транспорт, 1983. – 231 с.

134. Баранов А. М. Развитие пропускной и провозной способности однопутных линий / А. М. Баранов, В. Е. Козлов, Э. Д. Фельдман. – Москва: Транспорт, 1964. – 196 с.

135. Баланов В. О. Анализ факторов, влияющих на обеспечение движения грузовых поездов по расписанию / В. О. Баланов // Транспортні системи та технології перевезень: зб. наук. пр. ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. – 2015. – Вип. 10. – С. 5–9.

136. Козаченко Д. Н. Резервы времени при организации движения грузовых поездов по расписанию / Д. Н. Козаченко, Н. И. Березовый, В. О. Баланов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – № 2(56). – С. 105–115.

137. Папахов О. Ю. Обгрунтування руху поїздів на напрямках за погодженими розкладами / О. Ю. Папахов, Н. О. Логвінова // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 8. – С. 110–117.

138. Крамаренко Е. Р. Организация производственного процесса технического обслуживания устройств связи / Е. Р. Крамаренко. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 86 с.

139. Ракова А. М. Направление совершенствования методики оценки инвестиционных ресурсосберегающих проектов / А. М. Ракова // Транспортное дело России. – 2009. – № 7. – С. 145–148.

140. Курганская Н. И. Оценка экономической эффективности производства и планов технического развития предприятий / Н. И. Курганская, К. А. Бармута // Вестн. ДГТУ. – 2005. – Т. 5, № 2(24). – С. 217–227.

141. Кангро В. Методы оценки инвестиционных проектов: учебное пособие / М. В. Кангро. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. –131 с.

142. Инструкция по заполнению маршрута машиниста при интегрированной обработке на ЕС ЭВМ № ЦЧУ-4466. Утверждена 24.02.87 г. – М.: Транспорт, 1988. – 19 с.

143. Временные инструктивные указания по подготовке маршрутов машинистов в конторах оперативно-технического учета локомотивных депо для интегрированной обработки на ЭВМ. – М.: Транспорт, 1977. – 19 с.

144. Облікова ставка НБУ // Все про бухгалтерський облік. – 2016. – № 68. – С. 31

145. Лаврова Ю. В. Економіка підприємства та маркетинг: конспект лекцій / Ю. В. Лаврова. – Харьков: ХНАДУ, 2012. – 133 с.

ДОДАТОК А

Інтегрування рівняння руху поїзда по змінній часу

```

> restart : with(linalg) : with(plots) : Digits := 4 :
v0 := 80 : #Начальная скорость торможения.
ic := 0 : #Конечная скорость торможения.
n := 120 : #Уклон
K := 10 : #Расчётная сила нажатия чужуных тормозных колодок грузовых вагонов в среднем режиме на ось.
nl := 6 : #Число осей локомотива.
KI := 10 : #Расчётная сила нажатия тормозных колодок на ось локомотива.
Kp := KI * nl + K * n : #Сумма расчётных сил нажатия на тормозные оси поезда (тс).
Q := 2000 : #Масса состава.
Py := 138 : #Масса локомотива.
eta_p := evalf( (2 * (Q + Py)) / Kp ) : #Расчётный тормозной коэффициент поезда.
q0 := Q / n : #Нагрузка на ось.
fi_kp := v -> 0.27 * (v + 100) / (5 * v + 100) : #Расчётный коэффициент трения тормозных колодок.
Napol := [3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27] : eta := [0, 0.2, 0.45, 0.65, 0.8, 0.9, 0.95, 0.98, 1] : phi_p := t -> spline( Napol, eta, t, cubic ) :
f := v -> piecewise( v < 19.5, (29.075 * v^2 - 1607.445 * v + 81205.324) / (Q + Py) - 9.81, (0.003013 * v^4 - 0.880207 * v^3 + 97.578708 * v^2 - 5132.636714 * v + 129485.214754) / (Q + Py) - 9.81 ) :

w0 := v -> 0.7 + (3 + 0.1 * v + 0.0025 * v^2) / q0 : #Удельное сопротивление грузового вагона.
wx := v -> 2.4 + 0.011 * v + 0.00035 * v^2 : #Удельное сопротивление локомотива в режиме холостого хода.
w0x := v -> (Py * wx(v) + Q * w0(v)) / (Py + Q) : #Основное удельное сопротивление поезда.

eta_p := 0.2947
q0 := 50 / 3
fi_kp := v -> 0.27 * (v + 100) / (5 * v + 100)
phi_p := t -> spline( [ 3600, Napol, eta, t, cubic ]
(29.075 * v^2 + (-1) * 1607.445 * v + 81205.324) / (Q + Py) - 9.81, v < 100, (0.003013 * v^4 + (-1) * 0.880207 * v^3 + 97.578708 * v^2 + (-1) * 5132.636714 * v + 1.29485214754 * 10^5) - 9.81 ) / (Q + Py) - 9.81
w0 := v -> 0.7 + (3 + 0.1 * v + 0.0025 * v^2) / q0
wx := v -> 2.4 + 0.011 * v + 0.00035 * v^2
w0x := v -> Py * wx(v) + Q * w0(v) / (Q + Py)

> bt := simplify( -120 * (1000 - eta_p * fi_kp(v(t)) - phi_p(t) + w0x(v(t)) + ic) ) :

```


ДОДАТОК Б

Результати розрахунків часу ходу поїзда та витрати палива у фазі розгону

Таблиця Б.1

Результати розрахунків часу ходу поїзда для багатоваріантних режимів ведення

Ухил, ‰	Позиція контролера машиніста	Час ходу поїзда t , хв для маси складу Q , т				
		1000	1500	2000	2500	3000
-3,0	7	4,26	4,45	4,62	4,76	4,90
	9	4,21	4,35	4,48	4,59	4,71
	11	4,18	4,25	4,35	4,46	4,57
	13	4,10	4,17	4,25	4,32	4,42
	15	4,12	4,22	4,30	4,39	4,48
-1,5	7	4,14	4,39	4,65	4,90	5,14
	9	4,01	4,20	4,39	4,58	4,76
	11	3,91	4,07	4,21	4,36	4,50
	13	3,86	3,99	4,11	4,23	4,34
	15	3,58	3,94	3,94	4,16	4,27
0,0	7	4,07	4,49	4,90	5,79	7,00
	9	3,80	4,15	4,45	4,76	5,05
	11	3,64	3,90	4,15	4,37	4,60
	13	3,56	3,76	3,98	4,16	4,32
	15	3,49	3,66	3,85	4,04	4,19
1,5	7	4,16	4,75	-	-	-
	9	3,70	4,25	4,69	-	-
	11	3,59	3,90	4,24	4,55	4,89
	13	3,47	3,71	3,96	4,22	4,47
	15	3,36	3,61	3,81	4,03	4,25
3,0	7	4,34	-	-	-	-
	9	3,89	4,45	-	-	-
	11	3,58	4,00	4,42	4,86	-
	13	3,41	3,73	4,04	4,38	4,74
	15	3,31	3,55	3,84	4,12	4,42

Таблиця Б.2

Результати розрахунків витрати палива для багатоваріантних режимів ведення

Ухил, ‰	Позиція контролера машиніста	Витрата палива по масі складу, кг				
		1000	1500	2000	2500	3000
-3,0	7	6,30	9,07	11,85	13,93	15,83
	9	6,36	8,93	11,74	13,99	16,03
	11	6,85	9,52	12,19	14,72	16,62
	13	7,49	10,81	14,00	16,32	18,63
	15	8,52	12,52	16,58	19,87	22,92
-1,5	7	9,86	14,45	18,19	21,64	25,13
	9	9,78	14,26	17,79	21,67	25,20
	11	10,29	14,71	18,67	21,93	25,68
	13	11,58	16,27	20,45	24,22	28,29
	15	13,32	18,96	22,84	27,60	32,33
0,0	7	14,48	19,21	24,14	30,67	38,43
	9	14,11	19,42	24,13	29,03	32,59
	11	14,36	19,86	25,13	29,88	34,71
	13	15,46	21,59	27,09	32,86	37,98
	15	17,08	24,85	30,86	37,71	43,72
1,5	7	17,70	23,92	-	-	-
	9	16,51	24,12	30,46	-	-
	11	17,25	24,47	31,35	37,49	44,39
	13	18,20	26,22	32,65	40,18	47,47
	15	20,23	29,22	37,43	45,98	55,16
3,0	7	20,78	-	-	-	-
	9	20,12	28,95	-	-	-
	11	20,13	29,04	37,36	45,20	-
	13	21,53	30,83	40,04	48,66	57,06
	15	25,27	36,41	47,67	57,47	65,86

ДОДАТОК В

Рациональні режими ведення поїзда в фазі розгону

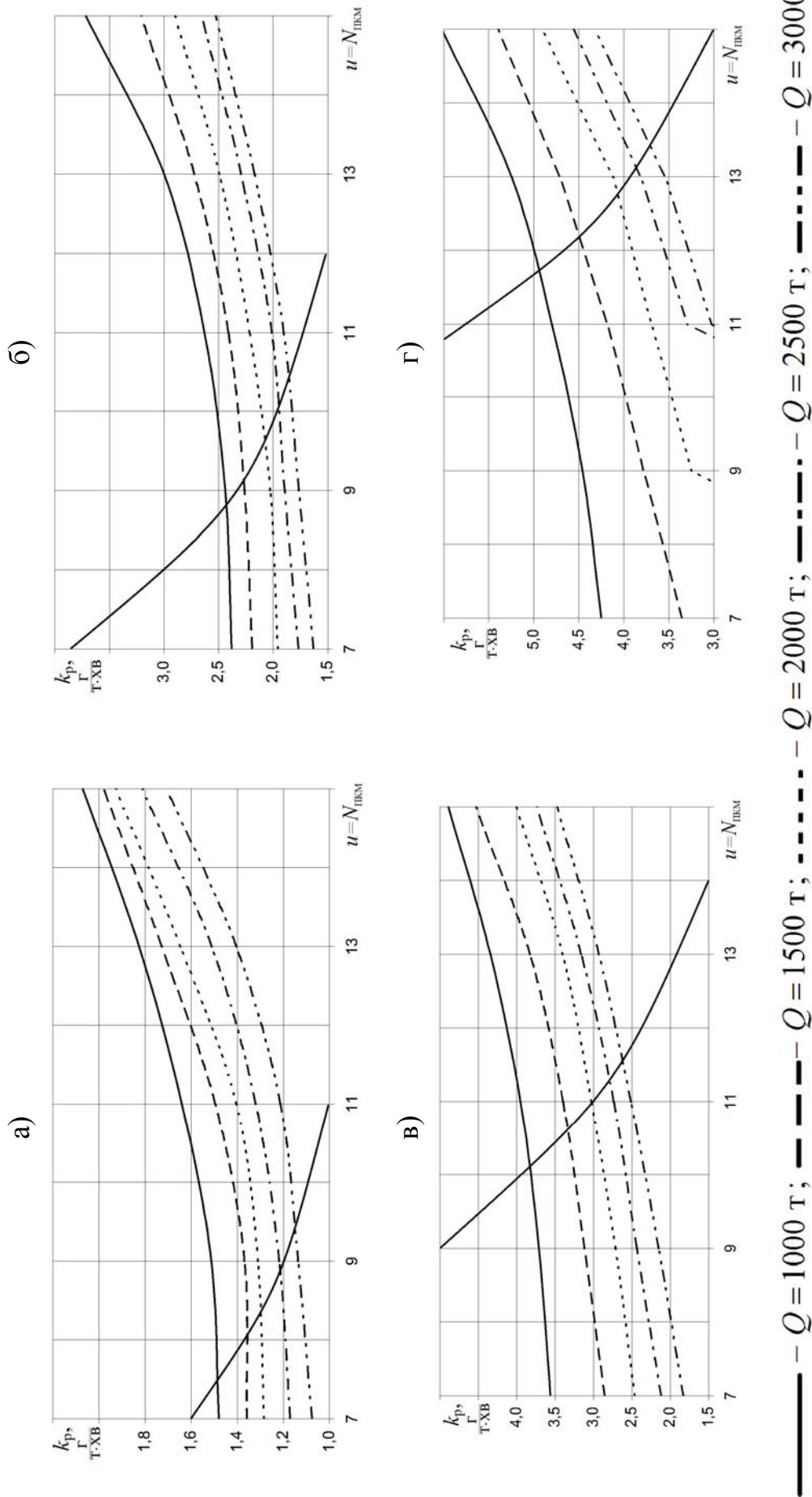


Рисунок В.1 – Рациональні режими ведення поїзда в фазі розгону

ДОДАТОК Г

Рациональні режими керування у фазі тяги

Таблиця Г.1

Значення позиції контролера машиніста відповідні мінімальним значенням
коефіцієнта питомої витрати палива

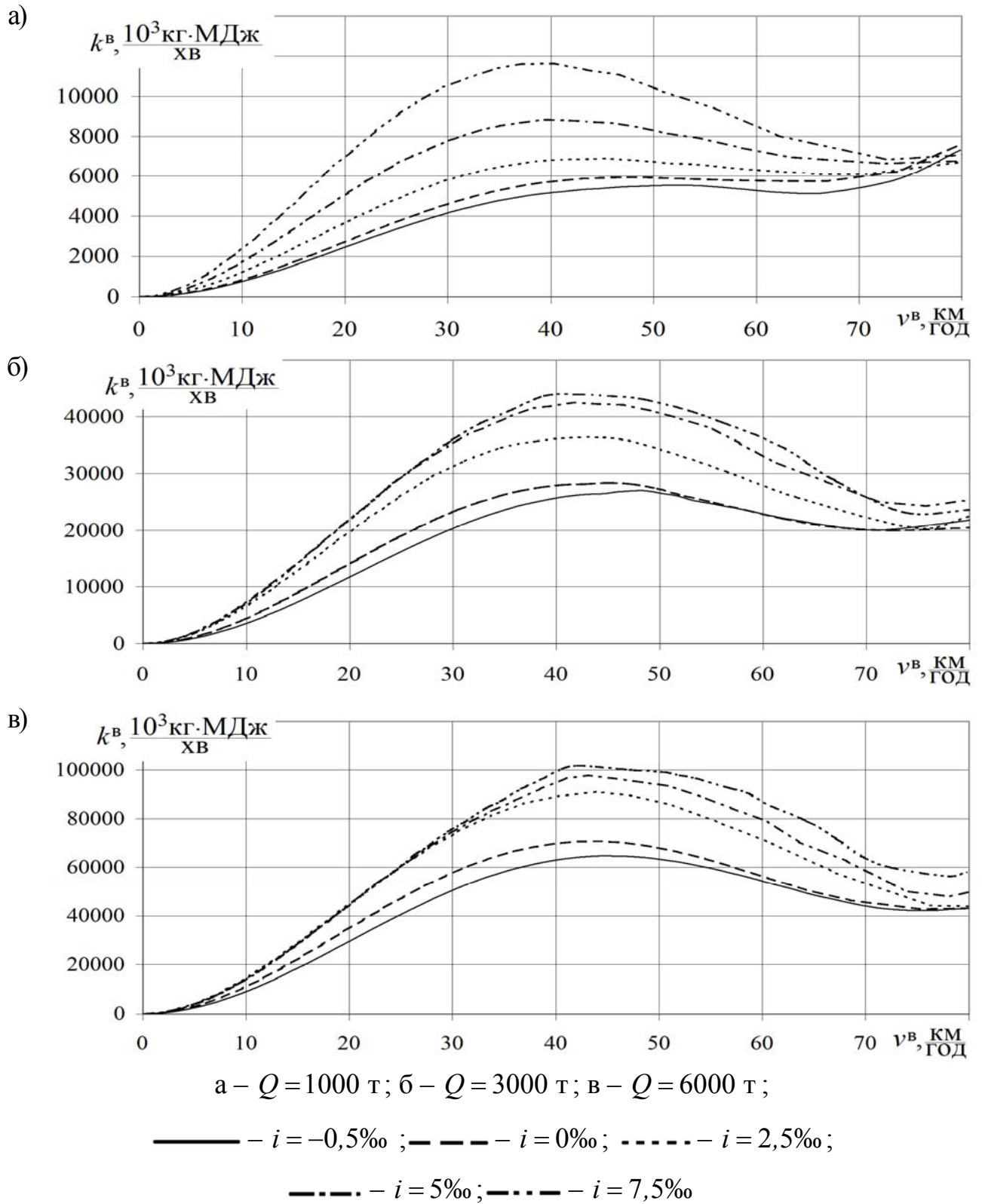
i , ‰	$N_{ПКМ}$ по масі складу, 10^3 т						i , ‰	$N_{ПКМ}$ по масі складу, 10^3 т					
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
-1,0	0	0	0	0	0	0	3,5	10	14	15	15	15	15
-0,5	3	6	8	10	10	10	4,0	11	15	15	15	15	15
0,0	6	10	10	11	12	12	4,5	11	15	15	15	15	15
0,5	7	11	12	13	13	14	5,0	12	15	15	15	15	15
1,0	8	12	13	14	14	14	5,5	12	15	15	15	15	15
1,5	8	12	14	14	14	14	6,0	13	15	15	15	15	15
2,0	9	13	14	14	14	15	6,5	13	15	15	15	15	15
2,5	9	14	14	15	15	15	7,0	14	15	15	15	15	15
3,0	10	14	15	15	15	15	7,5	15	15	15	15	15	15

Таблиця Г.2

Значення рівномірних швидкостей $v_{\text{рівн}} \square N_{\text{ПКМ}}^{\text{рац}} \frac{\min_{k_{\text{рш}}}}{\max_v}$

i , ‰	Рівномірна швидкість, км/год, по масі складу, 10^3 т						i , ‰	Рівномірна швидкість, км/год, по масі складу, 10^3 т					
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
-3,0	97,1	95,9	95,3	95,1	95,0	94,7	2,5	91,4	96,1	75,7	67,0	58,0	50,5
-2,5	86,6	84,1	83,0	82,3	82,0	81,6	3,0	96,2	91,2	75,8	62,1	53,2	45,9
-2,0	75,6	71,3	69,3	68,1	67,5	66,8	3,5	91,7	86,5	71,1	58,4	48,9	42,5
-1,5	64,2	57,8	54,4	52,4	51,1	50,0	4,0	95,9	87,9	66,7	54,3	45,1	39,0
-1,0	53,2	43,7	38,8	35,5	33,1	31,2	4,5	91,8	83,7	62,7	50,6	42,3	35,9
-0,5	64,7	78,1	78,7	80,7	73,6	68,1	5,0	96,6	79,6	58,9	47,2	39,3	33,2
0,0	92,9	98,2	82,8	77,8	75,0	68,6	5,5	92,8	75,8	56,5	44,2	36,6	30,8
0,5	96,1	98,3	87,6	81,6	72,7	70,0	6,0	98,0	72,3	53,3	42,0	34,2	28,7
1,0	98,6	99,0	87,3	79,8	70,3	63,0	6,5	94,5	68,9	50,4	39,5	32,0	26,8
1,5	93,1	93,3	86,7	73,5	63,9	57,4	7,0	98,7	65,8	47,7	37,2	30,1	25,1
2,0	96,3	95,0	81,0	67,7	58,5	55,7							

ДОДАТОК Д

Залежності коефіцієнта енергоефективності вибігу k^B фази вибігуРисунок Д.1 – Залежності коефіцієнта енергоефективності вибігу k^B

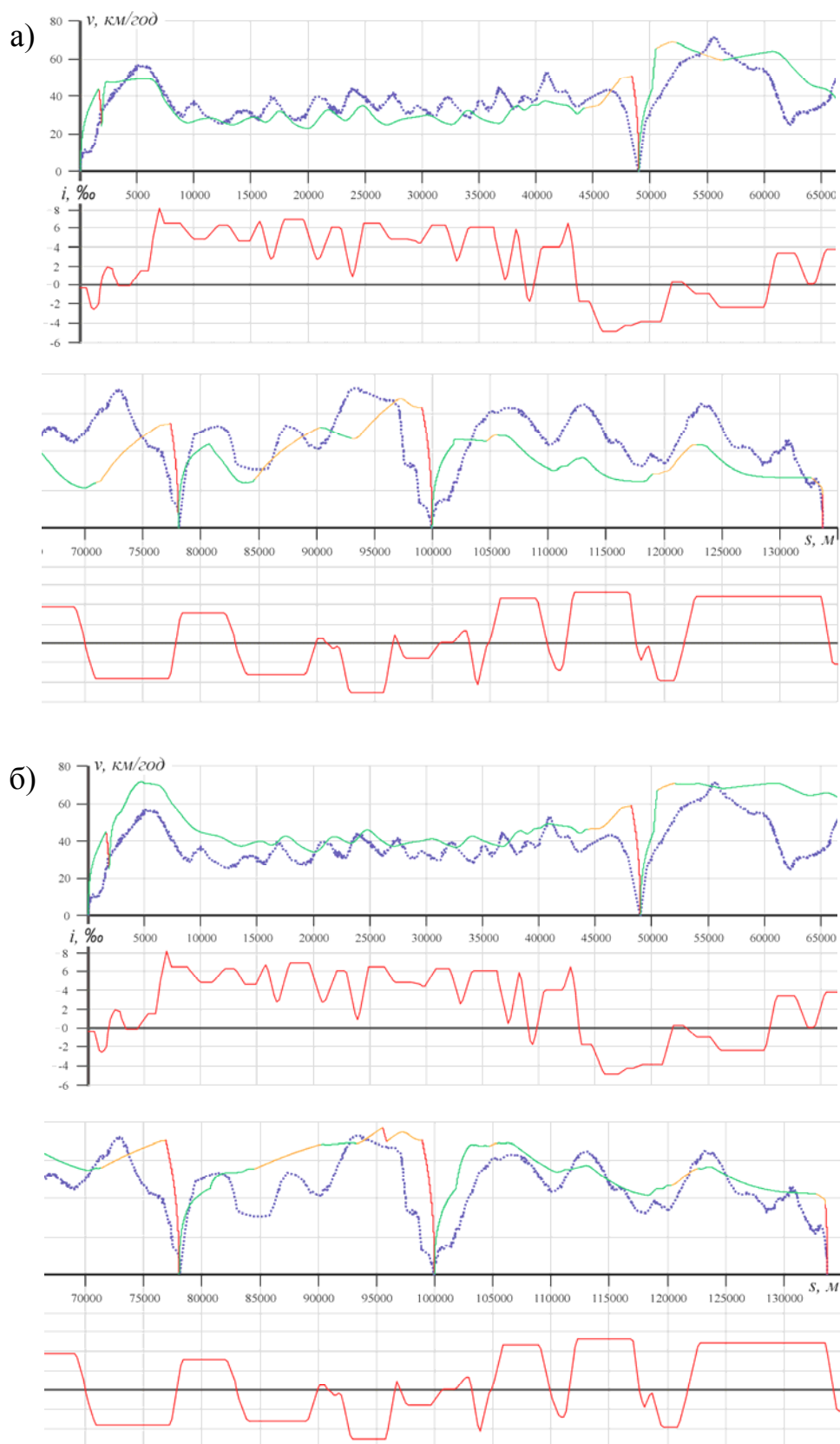
ДОДАТОК Ж

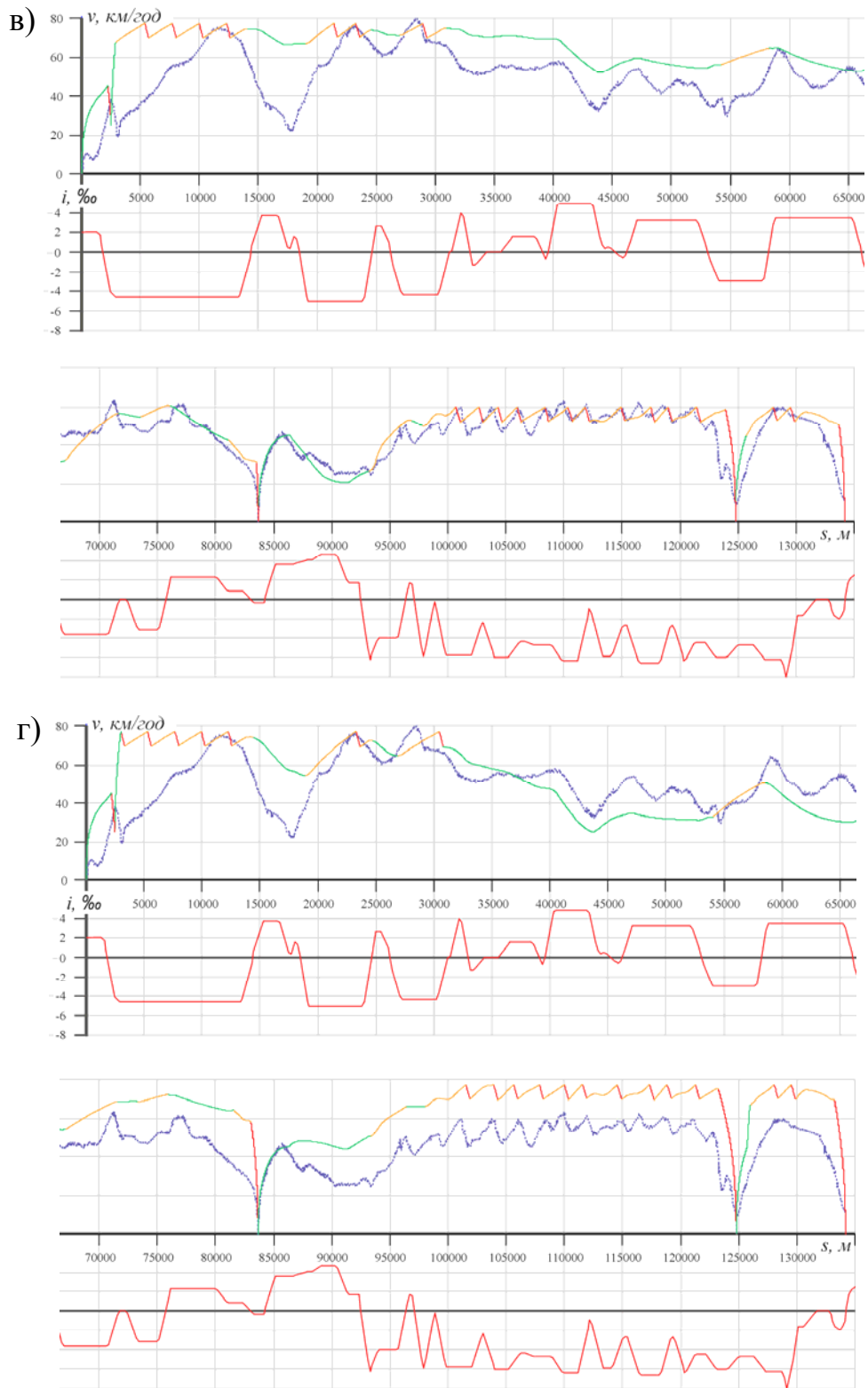
Спрямлений профіль ділянки Пологи – Волноваха

Прямий напрямок				Зворотний напрямок				
<i>i</i> , ‰	<i>s</i> , м		<i>i</i> , ‰	<i>s</i> , м	<i>i</i> , ‰	<i>s</i> , м	<i>i</i> , ‰	<i>s</i> , м
-0,309	890		-0,811	2270	0,000	250	-0,354	1800
-5,400	440		-2,300	4990	2,100	1650	3,627	2700
0,782	870		3,200	2820	-4,600	11940	4,044	1400
3,389	450		0,000	1590	0,000	880	4,704	2200
-0,033	2100		3,700	4800	3,700	2320	1,731	1930
1,580	1600		0,000	700	0,000	892	-7,325	690
11,898	300		-3,500	7500	2,700	650	-3,968	2650
6,313	2500		3,000	4816	-5,100	5840	1,675	1200
4,766	2300		0,000	814	2,700	1450	-5,922	1020
6,089	1900		-3,200	6174	0,000	740	-0,255	1000
4,488	1900		0,800	420	-4,400	4110	-5,794	3190
6,866	800		0,400	1080	0,000	1138	-2,320	1000
2,746	1200		-0,900	600	4,600	867	-6,057	2200
6,651	2800		0,000	700	-1,300	1200	-4,376	1300
2,757	1400		-4,900	3900	0,000	1400	-4,733	2400
5,936	1780		0,900	950	0,000	732	-6,376	2300
0,936	1120		-1,600	2918	1,600	2918	-0,936	1120
6,376	2300		0,000	732	-0,900	950	-5,936	1780
4,733	2400		0,000	1400	4,900	3900	-2,757	1400
4,376	1300		1,300	1200	0,000	700	-6,651	2800
6,057	2200		-4,600	867	0,900	600	-2,746	1200
2,320	1000		0,000	1138	-0,400	1080	-6,866	800
5,794	3190		4,400	4110	-0,800	420	-4,488	1900
0,255	1000		0,000	740	3,200	6174	-6,089	1900
5,922	1020		-2,700	1450	0,000	814	-4,766	2300
-1,675	1200		5,100	5840	-3,000	4816	-6,313	2500
3,968	2650		-2,700	650	3,500	7500	-11,898	300
7,325	690		0,000	892	0,000	700	-1,580	1600
-1,731	1930		-3,700	2320	-3,700	4800	0,033	2100
-4,704	2200		0,000	880	0,000	1590	-3,389	450
-4,044	1400		4,600	11940	-3,200	2820	-0,782	870
-3,627	2700		-2,100	1650	2,300	4990	5,400	440
0,354	1800		0,000	250	0,811	2270	0,309	890

ДОДАТОК 3

Порівняння траєкторій руху поїзда





а – при фіксованому часі ходу 211 хв в прямому напрямку; б – при нефіксованому часі ходу в прямому напрямку; в – при фіксованому часі ходу 146 хв в зворотному напрямку; г – при нефіксованому часі ходу в зворотному напрямку;

----- – фактична траєкторія; розрахункова траєкторія: ———— – режим тяги;
 ———— – режим вибігу; ———— – режим гальмування

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 64293

Комп'ютерна програма "Програмний комплекс для розрахунку раціональних режимів ведення поїзда тепловозами"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Кислий Дмитро Миколайович, Боднар Борис Євгенович, Капціца Михайло Іванович, Бобирь Дмитро Валерійович, Бульдович Дмитро Юрійович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Ак. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації

29.02.2016



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України

В.О. Голови А.А. Малиш

УКРАЇНА

UKRAINE



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 60715

**ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИНИ СТРУМУ
ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ТЕПЛОВОЗІВ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **25.06.2011.**

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

М.В. Паладій



УЗГОДЖЕНО:

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор
з наукової роботи ДНУЗТ**С. В. МЯМЛІН**Директор
ТОВ «НВП «Укртранскад»**О. П. ПІНЧУК**

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ**
«Виготовлення тривимірної панорами ділянки Ріг - Тимкове»
державний реєстраційний номер 015U001863

Ми, що підписалися, представник **Виконавця** – Проректор з наукової роботи ДНУЗТ Мямлін Сергій Віталійович, з однієї сторони, та представник **Замовника** – Директор ТОВ «НВП «Укртранскад» Пінчук Олена Петрівна, з другої сторони, склали цей акт про те, що згідно договору №79.20.15.15 від 03.08.2015 р. **Виконавцем** станом на 11.05.2016 р. виконано 100% робіт за договором та досягнути наступні результати.

Проведено огляд, аналіз чинників та виявлення причин, пов'язаних з режимом ведення поїздів, які впливають на витрату енергоресурсів. Розроблено методику визначення індивідуальних енергозаощаджуючих режимів ведення поїздів та складено режимну карту раціонального ведення поїздів для ділянки Кривий Ріг – Тимкове.

Впроваджуючи результати досліджень в цьому напрямку, за рахунок підвищення досвіду машиністів та використання режимних карт, стане можливим скоротити питомі витрати паливо-енергетичних ресурсів на тягу поїздів на 2-12% за рахунок вибору індивідуальних раціональних режимів ведення поїзда.

Керівник НДР

А.С. Акулов

А.О. Швець

« 11 » 05 2016 р.

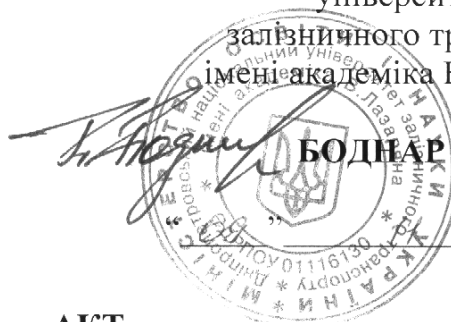
« 11 » 05 2016 р.

Д.М. Кислий

« 11 » 05 2016 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
Дніпропетровського національного
університету
залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна



БОДНАР Б. Є.

2016 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Кислого Дмитра Миколайовича
на тему «ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВЕДЕННЯ
ВАНТАЖНИХ ПОЇЗДІВ ТЕПЛОВИАЗАМИ»
у навчальний процес

Члени комісії у складі завідувача кафедрою «Локомотиви», доктора технічних наук, професора Капіци М.І., кандидата технічних наук, доцента кафедри «Локомотиви» Сердюка В.Н., кандидата технічних наук, доцента кафедри «Локомотиви» Очкасова О.Б. склали цей акт про те, що у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при виконанні курсових та дипломних робіт для студентів спеціальності 7(8).07010501 «Локомотиви та локомотивне господарство», при вивченні дисциплін «Теорія локомотивної тяги» та «Математичні методи та моделі» впроваджено такі результати, розроблені Кислим Д.М.:

- визначення енергозощаджуючих режимів керування локомотивом для окремих режимів руху поїздів за критерієм мінімізації витрати енергоресурсів та часу ходу поїзда;
- усереднення профілю колії по довжині поїзда з урахуванням розподілу маси складу та локомотива;
- математичне моделювання техніко-економічних характеристик локомотива;
- математичне моделювання руху поїзда в середовищі «Maple».

Завідувач кафедрою «Локомотиви»,
доктор технічних наук, професор

М.І. Капіца

Кандидат технічних наук,
доцент кафедри «Локомотиви»

В.Н. Сердюк

Кандидат технічних наук,
доцент кафедри «Локомотиви»

О.Б. Очкасов