

Г У У

Дніпропетровський державний технічний університет залізничного
транспорту

Гетьман Геннадій Кузьмич

Г. Гетьман

УДК 629.42.

З. 15

**НАУКОВІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО РЯДУ
ПОТУЖНОСТЕЙ ВАНТАЖНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ДЛЯ
ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ**

Спеціальність 05.22 09 - електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дніпропетровськ - 2001 р.

НТБ
ДНУЗТ

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Дніпропетровському державному технічному університеті залізничного транспорту Міністерства транспорту України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор Босов Аркадій Аркадійович, Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту, професор кафедри “Прикладна математика”

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Браташ Віктор Олександрович, Український науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут електровозобудування, м. Дніпропетровськ, директор;

доктор технічних наук, професор Панасенко Микола Васильович, Харківська державна академія залізничного транспорту, завідувач кафедри “Системи електричної тяги”

доктор технічних наук, професор Павленко Альберт Прокопійович, кафедра “Рухомий склад залізниць” Київського інституту залізничного транспорту, професор.

ий національний університет,
ти і науки України.

‘6___ 2001 р. в 14 годин на
20.01 при Дніпропетровському
ичного транспорту (ДІТ) за
ул. Акад. В.А. Лазаряна 2
ліотеці університету
___ 2001 р.

сop Хосен М О Костін

НТБ
ДНУЗТ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

В умовах ринкових економічних відносин стабільність функціонування залізничного транспорту визначається відповідністю ступеня раціоналізації експлуатаційної роботи умовам забезпечення конкурентноздатності залізничних перевезень у порівнянні з альтернативними видами транспорту.

Раціоналізація процесу перевезень неможлива без окреслення необхідного рівня технічної оснащеності залізниць, який визначається параметрами тягових і маневрових засобів, довжиною приймально-відправних колій станцій, припустимими максимальними швидкостями руху, параметрами системи тягового електропостачання тощо.

Можливі межі варіації найважливіших показників експлуатації залізниць, що визначають конкурентноздатність і економічність залізничних перевезень, - маси і швидкості руху вантажних поїздів за інших рівних умов визначаються дотичною потужністю локомотива, що може бути реалізована на керівному підйомі та у діапазоні швидкості руху від розрахункової до максимально припустимої. Тому визначення теоретичних і реальних основних параметрів перспективних локомотивів - одна з найважливіших задач у проблемі раціоналізації залізничних перевезень.

Актуальність теми дослідження. Стан тягових засобів залізниць України на даний момент не відповідає вимогам організації експлуатаційної роботи. Особливо гостро відзначена невідповідність відчувається на електрифікованих лініях, на які припадає головна частка вантажних і пасажирських перевезень. Так, на початок 1999 року 67 % електровозів постійного і 26 % електровозів змінного струму, що знаходяться в експлуатації, виробили свій ресурс і повинні бути виключені з інвентарного парку. До 2020 року практично усі вантажні електровози, які експлуатуються в даний час на залізницях України, вичерпають свій ресурс.

Перед Укрзалізницею стоїть складна задача оновлення електровозного парку. Сказане підтверджується прийнятими Міністерством транспорту України й Укрзалізницею рішеннями по насиченню електровозного парку новими електровозами, що знайшли відбиток у документі "Концепція та програма реконструкції на залізничному транспорті України"

Факт неминучості оновлення електровозного парку Укрзалізниці в сполученні з відсутністю достатніх коштів на удосконалення технічної бази, коли особливо важливо уникнути придбання малоефективної техніки, висуває розробку наукових основ визначення оптимальних зовнішніх параметрів перспективних електровозів і оптимальної стратегії оновлення електровозного парку в ряд найважливіших науково-практичних задач в області залізничного транспорту

Дніпропетровський
Інститут Інженерів
залізничного
транспорту
БІБЛІОТЕКА

НТБ
ДНУЗТ

6087a

Дисертаційна робота присвячена вирішенню зазначеної задачі відносно магістральних вантажних електровозів.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Обраний в дисертації напрямок досліджень визначено необхідністю рішення наукових задач, що виникли при виконанні Укрзалізницею і НВО «ДЕВЗ» Державної програми "Електротехніка" (підпрограма "Електровозобудування"), комплексної Державної програми енергозбереження України, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України №148 від 5.02.97 р. (розділ "Транспорт"), Державної програми розвитку залізничного транспорту України і постанови Кабінету Міністрів України №480 від 26.06.93 р. "Про розробку та виробництво в 1993-2000 роках магістральних вантажних та пасажирських електровозів", якими передбачалося створення нового електрорухомого складу для залізниць України, у першу чергу магістральних вантажних електровозів.

У ході виконання зазначених програм наказом Мінмашпрому, військово-промислового комплексу й Укрзалізниці №6 від 21.04.92 і Міністерства Транспорту України №217 від 03.05.94 р. на Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту були покладені обов'язки головної організації в частині розробки технічних вимог, експертизи технічних рішень і програми державних випробувань створених на Україні електровозів. Розробка технічних вимог на перспективні електровози виконувалася кафедрою "Електричний рухомий склад" під керівництвом автора.

Основна частина приведених у дисертаційній роботі наукових результатів отримана в ході виконання передбачених планами госпдоговірних робіт Укрзалізниці досліджень: "Аналіз стану електровозного парку і розробка технічних вимог на електровози для залізниць України" (договір №50/93 ЦТех, № держ. реєстрації 0194U002462) і "Визначення раціонального ряду потужності електровозів для забезпечення вантажних і пасажирських перевезень залізниць України" (договір №64/98 - 627. 99 ЦТех, № держ. реєстрації 0100U003185).

При виборі основних критеріїв оптимізації параметрів перспективних електровозів у дисертації враховані вимоги до електрорухомого складу, які передбачені програмою "Електрозбереження на залізничному транспорті України на період 1996 - 2010 роки", схваленою рішенням техніко-економічної ради Укрзалізниці від 26.06.96 р.

Мета і задачі дослідження. Метою даного дослідження є розробка наукових основ і практичних рекомендацій на вибір раціонального ряду потужностей вантажних електровозів і оптимальної стратегії відновлення локомотивного парку для підвищення ефективності залізничних перевезень за рахунок зниження капітальних вкладень на оновлення електровозного парку та зменшення витрат електроенергії на тягу поїздів.

Відповідно до поставленої мети основними задачами дослідження є розробка

методик визначення: оптимальної необхідної потужності локомотивів з урахуванням випадкового характеру зміни маси поїздів; параметрів закону розподілу частот маси составів і оптимальної необхідної потужності електровозів при обмеженні тривалості процесу формування поїздів; оптимальної градації потужності локомотивів для забезпечення вантажних перевезень на полігоні тяги; оптимальної стратегії переходу на новий тяговий рухомий склад; розробку рекомендацій на вибір основних зовнішніх параметрів перспективних електровозів для забезпечення вантажних перевезень на залізницях України.

Об'єкт дослідження процес переходу електрифікованих залізниць на перспективний тяговий електрорухомий склад.

Предмет дослідження основні зовнішні параметри (потужність номінального режиму і розрахункова швидкість) магістральних вантажних електровозів і показники ефективності переходу залізниць на новий тяговий рухомий склад.

Методи дослідження. Розроблені в дисертації методики визначення оптимальної градації потужності електровозів і стратегії переходу залізниць на новий рухомий склад базуються на використанні методів векторної оптимізації, принципу максимуму Л.С. Понтрягіна, методів оптимізації недиференційованих функцій.

Для розробки алгоритмів багатокритеріальної оптимізації тягових розрахунків використана ідея параметризації на основі множників Лагранжа і методи варіаційного числення.

При обробці статистичних даних і моделюванні характеристик електрорухомого складу застосовані методи теорії ймовірностей і покрокового регресійного аналізу.

Достовірність і обґрунтованість отриманих у дисертації наукових положень і результатів обумовлені використанням сучасних методів математичного моделювання, коректних допущень, перевірених практикою тягових розрахунків, узгодженістю результатів математичного моделювання й експериментальних даних (похибка розрахунку питомої витрати електроенергії і надлишкової потужності електровозного парку не перевищує 5-10 %), позитивним досвідом експлуатації дослідної партії електровозів ДЕ 1. Математичні моделі універсальних тягово-енергетичних і універсальних тягових характеристик забезпечують рівень розкиду, що пояснюється, вищий відповідно 93 і 97 %.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше:

- науково обґрунтовано принцип і процедуру визначення номінальної потужності електровозів, оптимальної за умов мінімуму витрат електроенергії і часу руху поїздів;
- сформульовано задачі визначення параметрів перспективних електровозів і оптимізації тягових розрахунків як задачі векторної оптимізації;

– отримано аналітичну залежність мінімального значення зчіпної маси електровоза від величини розрахункового підйому і маси поїзда, за допомогою якої рівняння руху поїзда подано у вигляді залежностей, що не містять масу состава в якості параметра і дають можливість виконання тягових розрахунків при невідомій масі состава;

– встановлено взаємозв'язок к.к.д., швидкості руху і сили тяги електрорухомого складу, обгрунтовано метод визначення питомих витрат електроенергії на тягу поїздів по роботі сили тяги з урахуванням режимів навантаження тягових двигунів;

– отримані аналітичні залежності для визначення координат граничних тягових характеристик електрорухомого складу, які забезпечують можливість виконання тягових розрахунків при розв'язанні задач тягового забезпечення на перспективу, коли тягові характеристики не задані;

– теоретично обгрунтовано ефективний алгоритм оптимізації режимів руху поїздів по мінімуму витрат електроенергії і часу ходу, що дало можливість звести розв'язок задачі до послідовного застосування одноваріантних процедур;

– розроблені математичні моделі взаємозв'язку потужності тягового модуля, надлишкової потужності потрібного парку електровозів і кратності тяги, які складають теоретичну базу для розв'язання задачі визначення оптимальної градації потужності вантажних електровозів;

– визначено залежність параметрів закону розподілу імовірностей потрібної потужності вантажних електровозів від тривалості процесу формування поїздів та характеристик джерел вантажопотоків;

– запропоновано та теоретично обгрунтовано принципи раціонального переходу залізниць на новий тяговий рухомий склад, який базується на використанні розроблених математичних моделей взаємозв'язку оптимальних обсягів постачань (списання), розподілу замовлень між заводами-виготовлювачами, вартості і тривалості періоду оновлення парку; особливість запропонованих моделей полягає в можливості урахування інфляційних процесів.

Винесені на захист наукові положення і результати складають теоретичну базу для вирішення важливої науково-технічної проблеми визначення оптимального ряду потужностей і стратегії відновлення парку вантажних електровозів.

Практичне значення отриманих у роботі результатів складають методики, розробка яких визначена основними цілями дослідження.

В результаті практичного застосування розроблених у дисертації методик і проведеного аналізу існуючих вантажопотоків для електрифікованих залізничних ліній України отримані:

закони розподілу частот оптимальної потрібної потужності вантажних електровозів, що складають основу для розв'язку задач тягового забезпечення;

НТБ
ДНУЗТ

– оцінки відповідності параметрів вантажних електровозів, що експлуатуються, основним параметрам перевізного процесу - масі і швидкості руху поїздів;

– рекомендації на вибір основних зовнішніх параметрів (потужності і розрахункової швидкості) перспективних вантажних електровозів і обґрунтування доцільності використання модульної тяги;

– рекомендації на вибір потужності тягового модуля та раціонального ряду потужностей електровозів для вантажних перевезень на залізницях України;

– оцінки економічної ефективності застосування для вантажних перевезень тягових модулів раціональної потужності.

Запропоновані методики визначення оптимальної потужності використані при розробці під керівництвом автора за завданням Укрзалізниці технічних вимог на створення вантажних магістральних електровозів постійного і змінного струму з колекторними тяговими двигунами, а також електровоза змінного струму з асинхронним тяговим приводом. Відповідно до зазначених технічних вимог НВО «ДЕВЗ» створено магістральний вантажний електровоз постійного струму ДЕ1 і розроблено технічну документацію на вантажний електровоз змінного струму ДС3.

Отримані в роботі висновки і рекомендації використовуються Головним управлінням локомотивного господарства Укрзалізниці при укладанні технічних вимог на нові вантажні електровози.

Запропоновані в роботі універсальні граничні тягові характеристики й універсальні тягово-енергетичні характеристики електрорухомого складу, а також заснована на їхньому використанні математична модель руху поїзда дає можливість розробки коректної інженерної методики визначення параметрів тягового електропостачання ділянок, де передбачається експлуатація перспективного електрорухомого складу.

Ряд теоретичних положень роботи, викладених у дисертації, використовуються в учбово-методичній роботі Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту при постановці курсів "Теорія електричної тяги" і "Алгоритми і методи прийняття рішень"

Особистий внесок здобувача. Автору дисертації належать:

– методика визначення оптимальної номінальної потужності вантажних електровозів [1, 5];

– універсальні граничні тягові і тягово-енергетичні характеристики електрорухомого складу [2, 3, 22];

– математична модель руху поїзда для розв'язання задач тягового забезпечення [4];

– одноваріантний алгоритм двохпараметричної оптимізації тягових розрахунків [6, 8];

НТБ
ДНУЗТ

- методика визначення оптимальної градації потужності вантажних електровозів [9, 12, 13, 21];
- математична модель взаємозв'язку маси вантажного поїзда і тривалості процесу формування [10, 23];
- математична модель взаємозв'язку норми маси і середньої маси поїздів при обмеженні тривалості процесу формування поїздів [11];
- методика визначення раціональної стратегії переходу на новий рухомий склад [14 - 20].

Роботи [1 - 5, 7, 9 - 26] написані автором особисто. У роботах [6, 8] автору належить наукове формулювання задачі та обґрунтування одноваріантного алгоритму двохпараметричної оптимізації тягових розрахунків.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення дисертаційної роботи докладалися і обговорювалися на нараді розробників магістральних електровозів України (м. Дніпропетровськ, 1992 р.), засіданні електровозної секції техніко-економічної ради Укрзалізниці (м. Харків, 1993 р.; м. Знам'янка, 1993 р.; м. Київ, 1993-98 р.), нараді представників зацікавлених організацій з питань будівництва електровозів для залізниць України (Мінмашпром України, Київ, 1993 р.), VII міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми розвитку рейкового транспорту" (Луганськ, 1997 р.), міжнародній конференції по математичному моделюванню "Фізико-технічні і технологічні додатки математичного моделювання" (м. Херсон, 1998 р.), 6-ї Українській конференції з автоматичного керування "Автоматика 99" (м. Харків, 1999 р.), семінарі наукової ради НАН України "Проблеми керування й інформатика" (м. Дніпропетровськ, 1999 г.), 5-ї міжнародній конференції спеціалістів-залізничників (Югославія, Врначка Баня, 1998 р.), міжнародній науково-теоретичній конференції "Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту" (м. Ростов-на-Дону, 1999 р.), науковому семінарі кафедри "Системи електричної тяги" Харківської державної академії залізничного транспорту (2001 р.), науковому семінарі і засіданнях кафедри "Електричний рухомий склад" Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту (1997, 2000 р.), науково-технічній раді Українського науково-дослідного інституту електровозобудування (2001 г.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 38 наукових праць, серед яких: 29 статей у наукових журналах і збірниках наукових праць; 3 доповіді на науково-технічних конференціях; 6 звітів по НДР. Основний зміст дисертації викладено в 26 наукових працях, з яких 24 написані без співавторів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків і 12 додатків. Загальний обсяг роботи 416 сторінок машинописного тексту. Основний текст дисертації містить 322 сторінки, 99 малюнків і 22 таблиці, список використаних джерел з 168 найменувань на 18

сторінках (28 сторінок основного тексту цілком зайняті малюнками і таблицями). Додатки на 72 сторінках включають 67 малюнків, 22 таблиці і документи про впровадження результатів роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обгрунтовано актуальність проблеми, яка розв'язується в дисертації, сформульована мета дисертаційної роботи, визначені її наукова новизна і практична цінність.

У *першому розділі* приведено аналіз стану проблеми вибору оптимального ряду потужності тягових засобів.

Проблема вибору основних параметрів і, зокрема, раціональної градації потужності тягових засобів, знаходилася в полі зору залізничної (галузевої) науки практично протягом всієї історії впровадження та експлуатації залізничного транспорту.

Серед робіт, присвячених проблемі визначення параметрів тягових засобів, найбільш важливі результати отримані відомими вченими: Ю.В. Ломоносовим, Б.Д. Воскресенським, Е.Е. Нойтельном, А.В. Вульфом, Д.А. Штанге, А.М. Бабічковим, С.П. Сиромятниковим, Л.В. Сломянским, А.Е. Гібшманом, Г.И. Черномордиком, Б.Э. Пейсахзоном, Н.А. Фуфрянским, И.П. Ісаєвим, В.Е. Розенфельдом, Л.А. Лисициним, А.В. Плаксом, А.Т. Бурковим, К.К. Тихоновим, Л.К. Пойловим, О.А. Некрасовим, В.О. Браташом, Б.Р. Бондаренко, Р. Klivanek і ін.

Проте результати зазначених досліджень не повною мірою можуть бути застосовані для вибору оптимальної градації потужності перспективних електровозів у зв'язку зі змінами умов роботи залізничного транспорту, які відбулися протягом останнього десятиліття.

Загальною характерною рисою виконаних досліджень є те, що їхні результати отримані в період планового розвитку економіки колишнього СРСР, коли основним напрямком розвитку залізничного транспорту була інтенсифікація його роботи за рахунок пошуку і реалізації науково обгрунтованих ефективних шляхів освоєння перевезень на лініях з високим рівнем використання пропускної спроможності.

З зазначеної причини у виконаних раніше дослідженнях не знайшли відбитку особливості роботи залізничного транспорту в умовах ринкових економічних відношень.

Для обгрунтування раціональної комбінації основних параметрів тягових засобів в сучасних умовах роботи транспорту і на перспективу необхідно дослідити взаємозв'язок основних технічних параметрів електровозів з основними

НТБ
ДНУЗТ

показниками експлуатаційної роботи, витратами енергії на здійснення перевезень і капітальних витрат на оновлення локомотивного парку.

Зазначене дослідження повинно бути проведене з метою визначення рішень, що забезпечують конкурентноздатність залізничних перевезень при максимальній прибутковості. При розв'язанні задачі необхідно врахувати, що в умовах ринкових економічних відношень маса поїздів може визначатися не тільки з умов повного використання потужності електровоза і довжини приймально-відправних колій роздільних пунктів, але і припустимою за умов забезпечення конкурентноздатності залізничних перевезень тривалістю процесу формування поїздів.

У приведеній вище постановці задача визначення оптимальних параметрів тягових засобів до тепер не розглядалася.

На підставі аналізу результатів досліджень, виконаних по проблемі визначення оптимального ряду (градації) потужності вантажних електровозів, визначені напрямки теоретичних досліджень, сформульовано мету і задачі дисертаційної роботи.

В другому розділі викладена методика визначення оптимальної потужності вантажних електровозів.

Виходячи з умов руху поїзда на розрахунковому підйомі з розрахунковою швидкістю й обмеження граничної сили тяги за умов зчеплення коліс з рейками, мінімальне значення потужності тривалого режиму електровоза визначається як

$$N_n \approx 2,725 \psi_{kp} k_p k_N Q V_p |_{V=V_p}, \text{ кВт}, \quad (1)$$

де ψ_{kp} - розрахунковий коефіцієнт зчеплення; Q - маса состава; V - швидкість руху; V_p - розрахункова швидкість; k_N - відношення потужності номінального режиму до потужності розрахункового режиму (реалізованої на розрахунковому підйомі); k_p - відношення маси електровоза до маси состава, рівне

$$k_p = \frac{(w_o''(V) + i_p)}{1000 \psi_k - (w_o'(V) + i_p)} \Big|_{V=V_p} \quad (2)$$

де w_o' і w_o'' - основний опір руху відповідно состава і електровоза в режимі тяги; i_p - розрахунковий підйом.

Номінальна потужність електровоза для тяги поїздів установленної маси на конкретній залізничній лінії, однозначно визначається розміром розрахункової швидкості. В якості показника раціональності вибору її значення доцільно прийняти мінімум витрат енергоресурсів і часу на доставку вантажів.

Виходячи з прийнятих показників раціональності вибору потужності електровоза, запропонована така процедура розв'язку задачі:

1. Для ряду фіксованих значень розрахункової швидкості:

- визначаються обмеження керуючих параметрів рівняння руху поїзда;

- на основі застосування методів векторної оптимізації визначається множина ефективних керувань u з класу допустимих керувань, кожне з яких реалізує рух поїзда при задоволенні граничних умов і заданих обмежень швидкості, а також мінімізує витрати енергії на рух поїзда a та час ходу по ділянці t ;

- постановкою у відповідність кожному ефективному керуванню u значень $a[u]$ і $t[u]$ для фіксованого значення V_p одержують криву $a^{\min}(t)$, яка відбиває залежність мінімальних питомих витрат енергії на рух поїзда від часу ходу по ділянці і характеризує дану ділянку незалежно від маси состава.

2. На підставі аналізу залежностей $a^{\min}(t)$, що відповідають множині реально припустимих значень розрахункових швидкостей V_p , визначається функція

$$a_{opt}(t) = \min_{V_p \in V_p} a(t, V_p), \quad (3)$$

яка представляє залежність мінімальних витрат енергії на одиницю перевізної роботи, що можуть бути досягнуті на заданій ділянці при заданому часі ходу. Одночасно визначається залежність оптимальної розрахункової швидкості від часу ходу $V_p^{opt}(t)$, на якій реалізується (3). Вона має вигляд рис. 1 а) і її варто розглядати в якості рекомендації на вибір розрахункової швидкості при визначенні номінальної потужності електровоза.

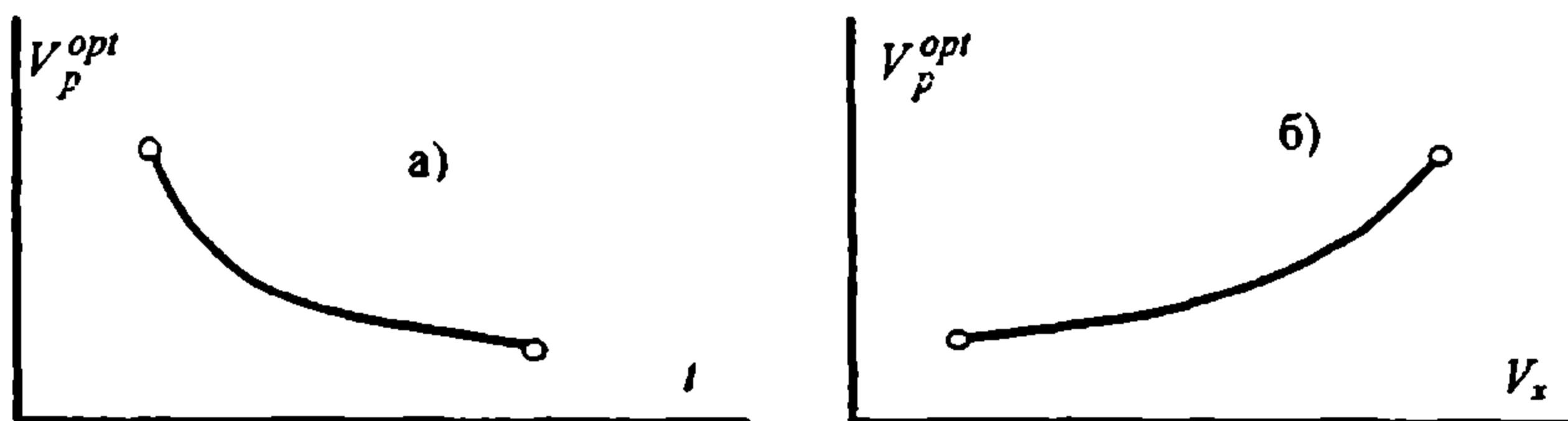


Рисунок 1 - Залежність оптимальної розрахункової швидкості від часу ходу (а) і ходової швидкості (б).

У задачах вибору параметрів тягових засобів у якості перемінної замість часу ходу по ділянці зручно використовувати ходову швидкість поїзда V_x . У цьому випадку в якості рекомендації на вибір розрахункової швидкості приймається залежність $V_p^{opt}(V_x)$, що має вигляд рис. 1 б), а оптимальне значення номінальної потужності електровоза визначається за формулою

$$N_{opt} = 2.725 k_N \psi_k (V_p^{opt}(V_x)) k_p (V_p^{opt}(V_x)) V_p^{opt}(V_x) Q,$$

що включає два істотних параметри - V_x і Q

Значення V_x і Q варто встановити з умови забезпечення конкурентноздатності залізничних перевезень у порівнянні з іншими видами транспорту.

Реалізація запропонованого підходу до визначення оптимальної потужності електровоза пов'язана з необхідністю виконання тягових розрахунків. У задачах тягового забезпечення особливістю тягових розрахунків є те, що вони повинні бути виконані при невідомих зовнішніх параметрах тягових засобів, у тому числі при невідомих тягових і струмових характеристиках електрорухомого складу. Тому в дисертації запропоновано підхід, який дозволяє при заданому типі вагонів і статичному навантаженні на осі вагонів представити керуючі перемінні в рівнянні руху поїзда у вигляді функцій однієї перемінної розрахункової швидкості електровоза.

Основний питомий опір руху в режимі тяги і вибігу:

$$w_o(V) = \frac{k_p w_o'(V) + w_o''(V)}{1 + k_p}; \quad w_{ox}(V) = \frac{k_p w_x(V) + w_o''(V)}{1 + k_p}$$

де w_x - основний питомий опір руху електровоза в режимі вибігу.

У залежності (2) для визначення k_p визначальними параметрами є: розрахункова швидкість V_p , розрахунковий підйом i_p , статичне навантаження на вісь вагона q_0 , а також тип тягового приводу і характеристика механічної частини, які визначають залежність розрахункового коефіцієнта зчеплення від швидкості $\psi_k(V)$.

Якщо прийняти $\psi_k(V)$ відповідно до рекомендацій Правил виконання тягових розрахунків для поїздної роботи, то залежність $k_p(i_p, V_p, q_0)$ можна апроксимувати формулою

$$k_p = (a_0 + a_1 q_0)^{-1} + a_2 i_p. \quad (4)$$

Значення коефіцієнтів a_0 , a_1 і a_2 формули (4), отримані шляхом опрацювання розрахункових даних методом найменших квадратів, приведені в табл. 1.

Таблиця 1 - Значення коефіцієнтів формули (4)

Тип електровоза	Межі варіації i_p , %	a_0	a_1	a_2	Розкид, що пояснюється, %
Постійного струму	6,0-12,5	33,370	13,669	0,003929	99,97
	24,0-30,0	-78,206	35,208	0,04171	99,47
Змінного струму	6,0-12,5	27,378	12,928	0,004390	99,97
	24,0-30,0	-80,408	33,388	0,004686	99,30

Сила тяги електровоза визначається в припущенні про плавне регулювання його потужності і зводиться до розрахунку координат граничної тягової характеристики

$$\bar{f}_y(V) = \min \{f_{cy}(V), f_{ky}(V)\}, V \in [0, V_{\max}],$$

де f_{cy} - гранична за умов зчеплення сила тяги в питомих одиницях (віднесена до 1 т маси поїзда); f_{ky} - питома сила тяги, що відповідає обмеженню по потужності електровоза; $V_{\max}$ - конструкційна швидкість.

Для визначення f_{cy} і f_{ky} запропоновані формули:

$$f_{cy} = \frac{1000\psi_k(V)k_p}{1+k_p}; \quad f_{ky} = \frac{1000\psi_{kp}k_p}{(1+k_p)k_f\beta} F_k^*(V^*),$$

де $\psi_{kp} = \psi_k|_{V=V_p}$; k_f - відношення розрахункової сили тяги до сили тяги годинного режиму; β - найбільший ступінь ослаблення збудження (колекторних тягових двигунів); $F_k^*(V^*)$ - гранична тягова характеристика в області обмеження сили тяги потужністю тягових двигунів; F_k^* і V^* - сила тяги і швидкість руху в одиницях сили тяги і швидкості руху годинного режиму.

Встановлено, що для електровозів одного роду струму характеристики $F_k^*(V^*)$ відрізняються незначно, тому в задачах тягового забезпечення можна використовувати універсальні характеристики $F_k^*(V^*)$, які отримано шляхом аналізу характеристик тягових двигунів методами регресійного аналізу:

$F_{k(1)}^* = a_0 + a_1/V^* + a_2/V^{*2}$; $F_{k(2)}^* = 1/(a_0 + a_1V^*)$; $F_{k(3)}^* = 1/(a_0 + a_1V^* + a_2V^{*2})$, де a_0 , a_1 і a_2 - постійні коефіцієнти. Їх значення, які отримані в результаті опрацювання дослідних даних для електровозів ВЛ10, ДЕ1, ВЛ80^Т і ВЛ15 для $0,80 \leq V^* \leq 2,45$, подані в табл. 2.

Таблиця 2 - Значення коефіцієнтів у формулах $F_k^*(V^*)$

Тип електрорухомого складу	Формула	a_0	a_1	a_2	Розкид, що пояснюється, %
Постійного струму	$F_{k(1)}^*(V^*)$	0,8095	-2,8552	3,0872	99,22
	$F_{k(2)}^*(V^*)$	-1,9561	3,0364	—	95,24
	$F_{k(3)}^*(V^*)$	1,7667	-4,7886	3,9819	99,36
Змінного струму	$F_{k(1)}^*(V^*)$	0,4567	-1,7448	2,3127	99,01
	$F_{k(2)}^*(V^*)$	-2,2903	3,3518	—	97,52
	$F_{k(3)}^*(V^*)$	0,4057	-1,7329	2,3169	99,15

Перехід від поточного значення швидкості до її величини у відносних одиницях V^* визначається як $V^* = V k_V / V_p$, де коефіцієнт k_V дорівнює відношенню розрахункової швидкості до швидкості годинного режиму.

Для електровозів постійного струму

$$k_V = \frac{a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4(k_f - a_0)a_2}}{2(k_f - a_0)}.$$

Для електровозів змінного струму $k_V = 0,80 \div 0,85$.

При використанні універсальних граничних тягових характеристик і прийнятого підходу до визначення маси електровоза керуючі змінні в рівнянні руху не залежать від маси состава й однозначно визначаються двома параметрами - розрахунковим підйомом і розрахунковою швидкістю V_p . Тому для конкретної залізничної лінії криві руху визначаються тільки режимом ведення поїзда і прийнятої величини V_p . Остання обставина дає можливість оптимізації тягових розрахунків по будь-якому показнику, що не є функцією маси состава. Зокрема до таких показників належить питома витрата енергії на рух поїзда

$$a = \frac{2,725(1 + k_p)}{(S_k - S_n)} \int_{S_n}^{S_k} \frac{f_k(S)}{\eta(S)} dS, \quad \frac{\text{Вт} \cdot \text{г}}{\text{т} \cdot \text{км}}, \quad (5)$$

і питома витрата енергії на власні потреби

$$a_{сн} = 2,725 \cdot 10^3 k_{сн} k_N k_p \psi_{кр} V_p V_y^{-1}, \quad \text{Вт} \cdot \text{г} / \text{т} \cdot \text{км},$$

де η - к.к.д. електровоза; S_n , S_k координати початку і кінця ділянки; V_y дільнична швидкість; $k_{сн}$ - відношення потужності споживачів власних потреб до потужності номінального режиму електровоза.

Для визначення витрати енергії по (5) у роботі отримана модель залежності к.к.д. тягового двигуна від сили тяги і швидкості руху електровоза, тобто так звана тягово-енергетична характеристика.

Аналіз експериментальних даних показав, що в області $F_k^* V^* \geq 0,05$ для всіх типів тягових двигунів вантажних електровозів можна використовувати єдину або універсальну тягово-енергетичну характеристику у вигляді поліноміальної регресивної моделі

$$\eta^* = a_0 - a_1 / F_k^* - a_2 / V^*, \quad (6)$$

де η^* - к.к.д. у частках його значення, що відповідає годинному режиму роботи тягових електродвигунів, а значення постійних коефіцієнтів рівні: $a_0 = 0,8917$; $a_1 = 0,0031$; $a_2 = 0,0183$.

Модель (6) в області $F_k^* V^* \geq 0,05$ забезпечує розкид, що пояснюється, вищий 0,94 і стандартне відхилення помилок апроксимації, яке не перевищує 0,04.

При значеннях $F_k^* V^* < 0,05$, що на практиці зустрічаються тільки в період пуску, залежність $\eta^*(F_k^*, V^*)$ апроксимується рівняннями площин, які запропоновано в роботі.

НТБ
ДНУЗТ

У *третьому розділі* аналізується можливість застосування методів векторної оптимізації до розв'язку двокритеріальної задачі оптимізації тягових розрахунків і приведення обґрунтування одноваріантного алгоритму оптимізації, використаного в роботі для визначення розрахункових швидкостей електровоза, оптимальних по мінімуму витрат енергії і часу на здійснення перевезень.

Розглянуто задачу про переміщення поїзда на ділянці колії $S \in [S_n, S_k]$. Заданими вважаються: характеристики повздовжнього профілю, припустимі керування $u(S)$ і граничні умови: $V(S_n) = V_n$; $V(S_k) = V_k$.

При прийнятих критеріях оптимальності оптимізація тягових розрахунків полягає у визначенні такого керування $u(S)$ з класу припустимих, щоб відповідний йому розв'язок рівняння руху поїзда $V(S)$ задовільняв обмеженням по швидкості, граничним умовам і мінімізував би два функціонала:

$$\left(t = \int_{S_n}^{S_k} \frac{dS}{V(S)}; \quad a = \int_{S_n}^{S_k} w(V(S)) dS \right) \rightarrow \min, \quad (7)$$

де питомий опір руху поїзда

$$w(V) = \sum_{k=0}^n a_k V^k, \quad a_k \geq 0, \quad k = \overline{0, n}.$$

Передбачається, що набір припустимих керувань, що реалізують мету (7), являє собою не порожню множину U . Тоді, якщо $u_1(S) \in U$ є керування по швидкодії (крива $V_1(S)$ на рис. 2), то йому відповідає мінімальний час ходу $t = \min t$ і максимальна робота сил опору руху $a[u_1]$. Для будь-якого керування $u(S) \neq u_1(S)$, $S \in [S_n, S_k]$ час ходу $t > t$, а швидкість руху задовільняє умову $V(S) \leq V_1(S)$, $S \in [S_n, S_k]$.

Якщо $u_2(S)$ є керування, якому відповідає $a[u_2] = \min a[u]$ при обмеженні $t[u_2] = t_2 > t$, то справедливі рівності:

$$a[u_1] = \int_{S_n}^{S_k} \sum_{k=0}^n a_k (V_1(S))^k ds; \quad a[u_2] = \int_{S_n}^{S_k} \sum_{k=0}^n a_k (V_2(S))^k ds,$$

із яких випливає відношення

$$a[u_2] < a[u_1]. \quad (8)$$

Розв'язок задачі (7) будується у вигляді об'єднання по α

$$V_\alpha = \{V_\alpha(S), S \in [S_n, S_k]: V_\alpha = \alpha V_1(S) + (1-\alpha)V_2(S), \quad 0 \leq \alpha \leq 1\},$$

що, як випливає з (8), складається з непорівнянних по Парето варіантів. Тому, якщо множина V^P є рішенням задачі (7), то $V_\alpha \subseteq V^P$

Об'єднання V_α залежить від часу ходу t_2 , причому при $t_2 \rightarrow \infty$ має місце

$$V_\alpha(\infty) = V^P \quad (9)$$

При фіксованому $t_2 > t$ множина $V_\alpha(t_2)$ є обмежена, опукла і компактна.

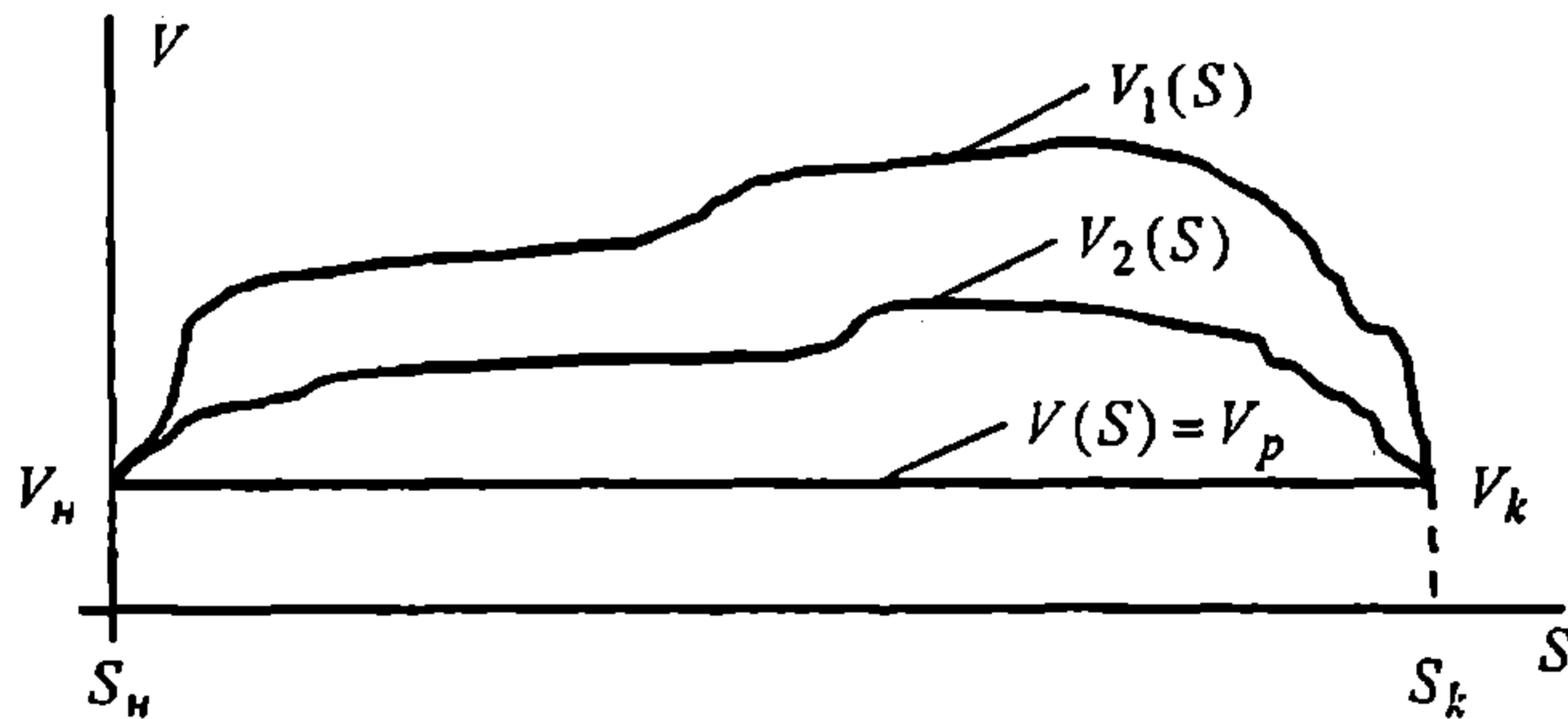


Рисунок 2 - Криві швидкості для керувань $u_1(S)$ і $u_2(S)$.

Твердження (9) дозволяє істотно спростити розв'язок задачі (7), оскільки він стає одноваріантним і зводиться до розв'язку двох задач:

- виконанню тягового розрахунку при керуванні по швидкодії;
- мінімізації роботи сил опору руху при заданій тривалості ходу.

При рішенні задач тягового забезпечення в більшості випадків керування $u_2(S)$ можна вибрати з умови руху поїзда з постійною швидкістю, рівною розрахунковій, тобто прийняти $V_n = V_k = V_2(S) = V_p$.

Такий підхід можливий, якщо на даній ділянці не встановлені обмеження швидкості нижче розрахункової. У випадку, коли зазначена умова не виконується, для визначення $u_2(S)$ можуть бути використані відомі методи однопараметричної оптимізації тягових розрахунків або спрощені процедури, запропоновані в дисертації.

У четвертому розділі приведені обґрунтування методики визначення раціональної градації потужності вантажних електровозів.

Обґрунтовано доцільність використання в якості критерію раціональності вибору градації потужності вантажних електровозів мінімуму надлишкової потужності потрібного електровозного парку (мінімуму сумарної потужності парку) і мінімуму кратності тяги, яка необхідна для формування тягових зчепів потрібної потужності.

У прийнятій постановці задача визначення оптимальної градації потужності належить до класу задач векторної оптимізації, розв'язок яких може бути подано сукупністю непорівнянних по Парето варіантів співвідношень надлишкової потужності парку електровозів і кратності тяги.

Аналіз показав, що зі збільшенням кількості градацій потужності зростає повнота використання потужності локомотивного парку, проте при цьому ростуть труднощі добору електровозів для поїздів різної маси в експлуатації. Застосування електровозів різних типів на одній і тій же ділянці обертання є вкрай незручним в експлуатації і частіше усього невигідним в техніко-економічному відношенні,

тому що знижує середньодобовий пробіг і погіршує використання електровозного парку. У техніко-економічному відношенні прийнятне застосування одностипних тягових модулів або, у крайньому випадку, модулів двох типів.

При заданому теоретичному розподілі імовірностей потрібної потужності електровоза $f_{Nj}(t)$ для кожної з $j = \overline{1, s}$ ділянок обертання полігона тяги мінімальне значення кратності тяги y_{kj} і надлишкової потужності тяги y_{Nj} , що припадають на один поїзд:

$$y_{Nj} = \int_0^{rx} (rx - t) f_{Nj}(t) dt + \sum_{i=0}^m \int_{(r+i)x}^{(r+i+1)x} [(r+i+1)x - t] f_{Nj}(t) dt; \quad (10)$$

$$y_{kj} = r \int_a^{rx} f_{Nj}(t) dt + \sum_{i=0}^m (r+i+1) \int_{(r+i)x}^{(r+i+1)x} f_{Nj}(t) dt, \quad i = \overline{0, m}, \quad (11)$$

де x - потужність тягового модуля; $r = r_j = v_j + 1$, $m = m_j = n_j - r_j$, $i = i_j = \overline{0, m_j}$; $v_j = [a_j / x]$; $n_j = [b_j / x]$; b_j і a_j - відповідно найбільше і найменше значення потужності в розподілі $f_{Nj}(t)$.

Залежності (10) і (11) відповідають потужності модуля $0 < x < b_j$. При $x \geq b_j$ маємо

$$y_{Nj} = \int_{a_j}^{b_j} (x - t) f_{Nj}(t) dt; \quad y_{kj} = 1.$$

Середні значення надлишкової потужності і кратності тяги для полігона:

$$y_N = \sum_{j=1}^s \beta_j y_{Nj}, \quad y_k = \sum_{j=1}^s \beta_j y_{kj}, \quad j = \overline{1, s}.$$

Величина β_j характеризує структуру розподілу парку електровозів між ділянками обертання полігона:

$$\beta_j = \frac{\alpha_j i_{pj}}{\sum_{j=1}^s \alpha_j i_{pj}}; \quad \alpha_j = \frac{(\Sigma QL)_j}{\sum_{j=1}^s (\Sigma QL)_j}, \quad j = \overline{1, s},$$

де α_j визначає структуру розподілу тонно-кілометрової перевізної роботи на j -й ділянці обертання. При розв'язку задачі для кожної ділянки приймається той напрямок руху, який характеризується більшим значенням β_j .

Доведено правомірність визначення y_N і y_k безпосередньо за допомогою залежностей типу (10) і (11) після заміни в них розподілу $f_{Nj}(t)$ розподілом потрібної потужності для полігона тяги

$$f_N(t) = \sum_{j=1}^s \beta_j f_{N_j}(t), \quad j = \overline{1, s}.$$

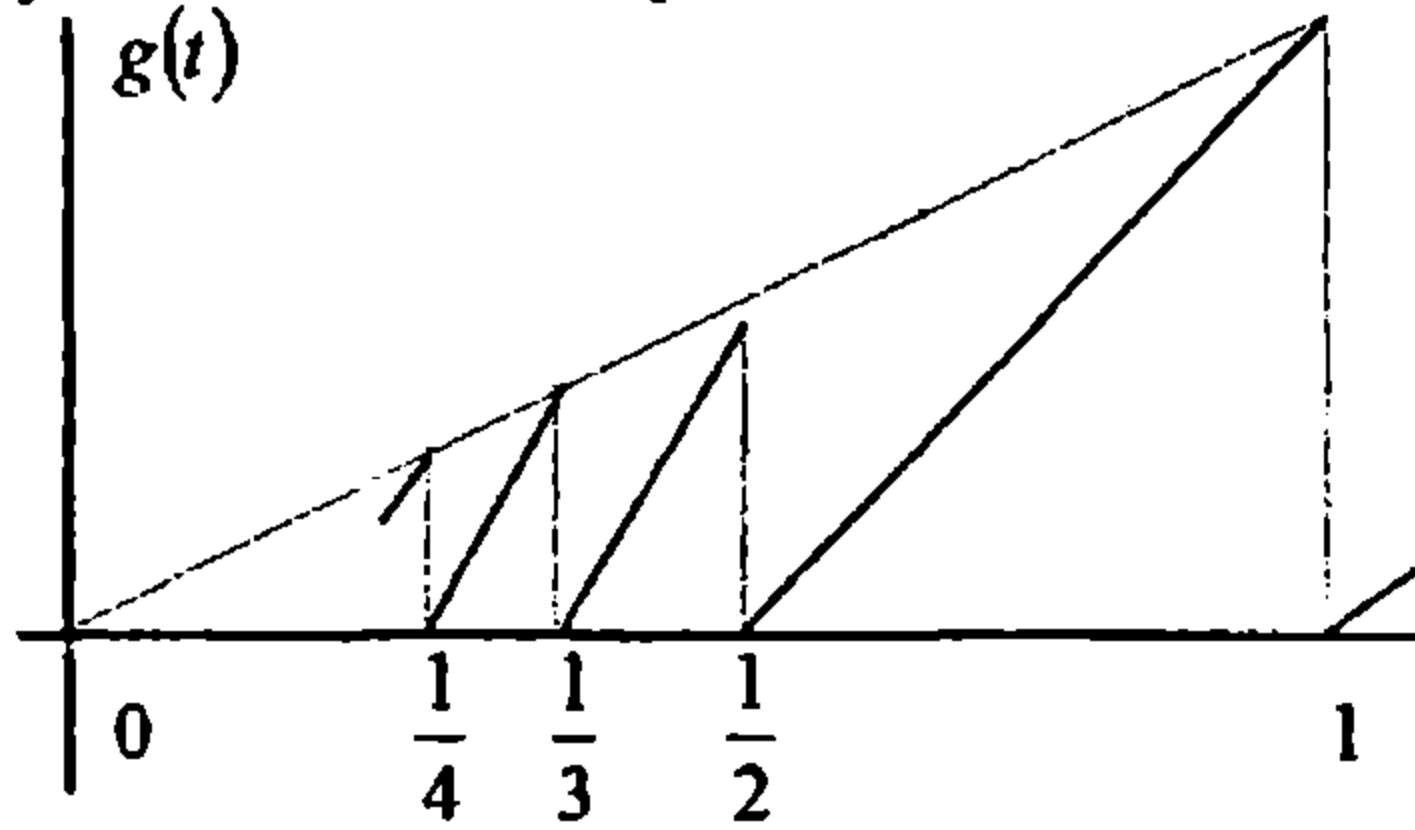
При визначенні $f_N(t)$ слід прийняти: $a = \min\{a_j\}$; $m = \max\{m_j\}$; $r = \min\{r_j\}$.

Побудовано математичні моделі взаємозв'язку параметрів оптимізації і потужності тягового модуля для дискретного розподілу потрібної потужності $N_i(p_i)$, $i = \overline{1, n}$. Розглянуто формування тягових зчепів із модулів однакової і різної потужності.

Для зручності зображення моделей запропонована функція

$$g(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \frac{1}{|t|} - \text{ціле число} \\ \left(\left[\frac{1}{|t|} \right] + 1 \right) t - \text{Sign}(t), & \text{якщо } \frac{1}{|t|} - \text{дрібне число} \end{cases}$$

графік якої подано на рис. 3.



Якщо електровозний парк складається з тягових модулів, які мають потужності $x = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, то за умови, що при формуванні тягового зчепи використовуються тільки однотипні модулі, середні значення надлишкової потужності і кратності тяги будуть рівні:

Рисунок 3 – Графік функції $g(t)$.

$$\begin{aligned} y_N(x_1, x_2, \dots, x_m) &= \sum_{i=1}^n P_i N_i \min_{1 \leq v \leq m} \left\{ g\left(\frac{x_v}{N_i}\right) \right\}; \\ y_k(x_1, x_2, \dots, x_m) &= 1 + \sum_{i=1}^n P_i \min_{v \in I_i(x_1, \dots, x_m)} \left\{ \left[\frac{N_i}{x_v} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

де $I_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ - набір номерів, на яких реалізується $\min_{1 \leq v \leq m} \left\{ g\left(\frac{x_v}{N_i}\right) \right\}$.

У загальному випадку, коли допускається застосування змішаної тяги, потужність i -го зчепу формується у виді $x_i = k_{1i}x_1 + k_{2i}x_2 + \dots + k_{mi}x_m$ при

виконанні умов: $k_1, k_2, \dots, k_m = 1, 2, 3, \dots$; $k_1 \neq 0, \dots, k_m \neq 0$; $\sum_{i=1}^m k_i \leq M$, де M –

максимально припустима кількість модулів у зчепі.

НТБ
ДНУЗТ

Означені умови визначають область припустимих значень вектора $\{k_i\}$, кожний елемент якого являє собою вектор із компонентами $(k_1, k_2, k_3, \dots, k_m)$

Надлишкова потужність і середня кратність тяги рівні:

$$y_N(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{i=1}^n P_i N_i \min_{k \in D(M)} g\left(\frac{\langle k, x \rangle}{N_i}\right); \quad y_k(x) = \sum P_i \langle k(x, N_i), 1 \rangle, \quad (13)$$

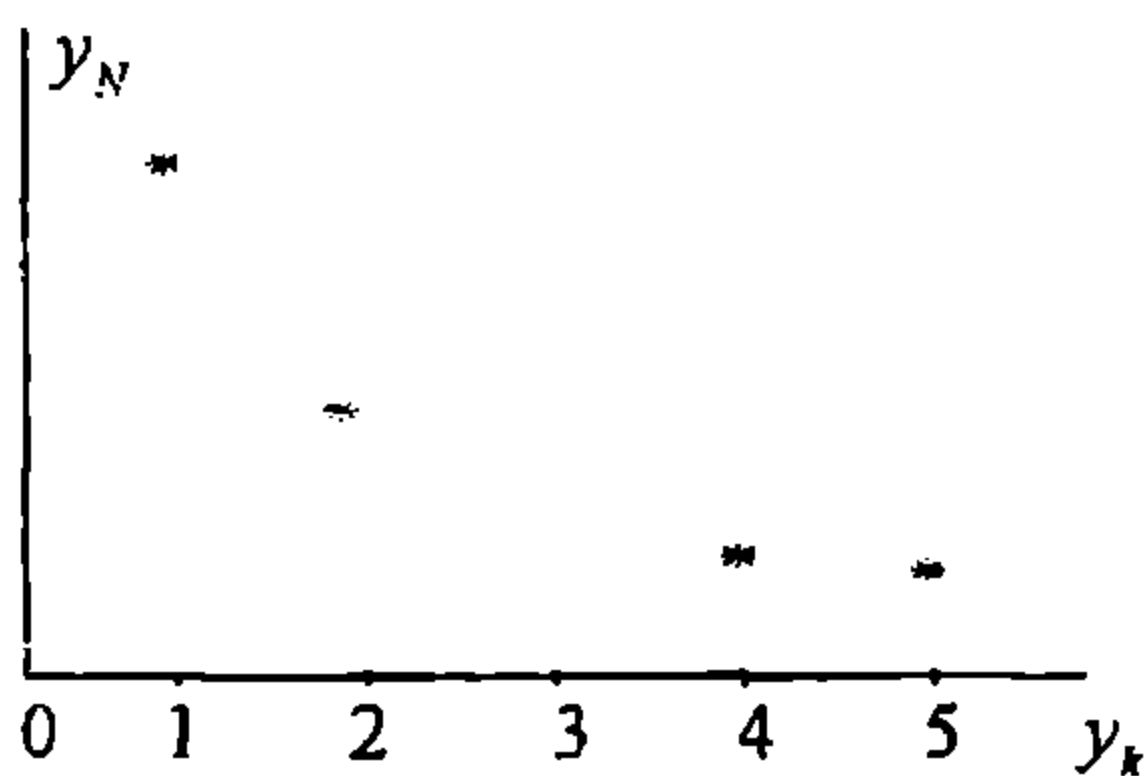
де 1 - вектор із компонентами, рівними одиниці.

Прагнення одержати мінімальну сумарну потужність електровозного парку при найменшій кількості модулів у тяговому зчепі призводить до задачі векторної оптимізації:

$$y_N(x) \rightarrow \min; \quad y_k(x) \rightarrow \min \text{ при } x > 0.$$

Функції $y_N(x_1, x_2, \dots, x_m)$ і $y_k(x_1, x_2, \dots, x_m)$ є недиференційованими, тому при розв'язанні задачі для випадку дискретного розподілу потужності необхідно використовувати тільки методи оптимізації, що не потребують існування похідних.

Розв'язок даної задачі має вигляд графіка, поданого на рис. 4.



Малюнок 4 - Якісний характер залежності $y_N(y_k)$.

Закон розподілу потрібної потужності $f_N(t)$ визначається розподілом маси поїздів $f_Q(t)$ відповідно до формули (1).

Для діючої залізничної лінії припустимо використовувати гістограми розподілу фактичних мас поїздів. У розрахунках на перспективу доцільно врахувати вплив чинника часу, який в умовах загострення на ринку транспортних послуг конкуренції альтернативних видів транспорту неминуче виявляється у

вигляді обмеження тривалості накопичення составів і призводить до відступу від чинного дотепер правила формування поїздів, коли маса поїзда визначається вимогами повновагості або повноскладності.

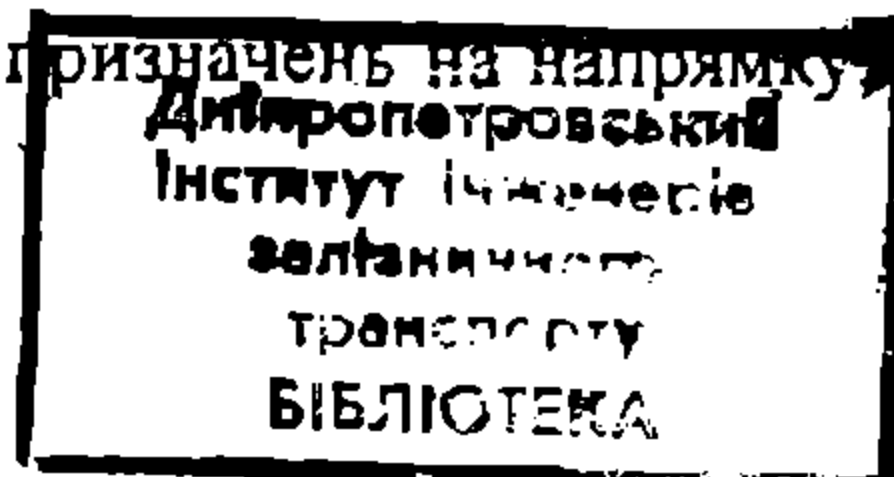
У дисертації розроблені математичні моделі взаємозв'язку параметрів закону розподілу маси поїздів, характеристик джерел вантажопотоків і тривалості процесу формування поїздів.

Вантажопотік і швидкість формування поїздів j -го призначення плану формування поїздів визначаються як:

$$\Gamma_j = \sum_{i=1}^m u_{ij}; \quad V_j = \Gamma_j \sum_{i=1}^{m_j} l_i \alpha_{ij}; \quad \alpha_{ij} = \frac{u_{ij}}{\Gamma_j}; \quad i = \overline{1, m_j}; \quad j = \overline{1, n},$$

де u_{ij} - інтенсивність пред'явлення вантажу i -го типу в поїзди j -го призначення;

m - число типів вантажів; n - число призначень на напрямку; α_{ij} - коефіцієнти,



що характеризують структуру вантажопотоків; l_i - необхідна для перевезення 1 тонни вантажу i -го типу довжина рухомого складу.

Середня довжина поїзда, яка необхідна для перевезення одиниці вантажу з потоку Γ_j , і середнє поїздне погонне навантаження на призначенні:

$$L_j = \sum_{i=1}^{m_j} a_{ij} l_i; \quad P_j = 1/L_j.$$

Вантажопотік, маса і довжина поїзда пов'язані співвідношеннями:

$$Q_j = \Gamma_j \tau; \quad L_j = V_j \tau; \quad Q_j = L_j P_j; \quad L_j = \Gamma_j / P_j, \quad (14)$$

де τ - тривалість процесу формування поїзда.

З точки зору математичної статистики поїздне погонне навантаження відноситься до інерційних показників і в розрахунках на перспективу може бути прийняте постійним і рівним фактичному значенню для останнього періоду.

Тривалість процесу формування повновагових і повноскладних поїздів:

$$\tau_{nj} = \frac{L_{no} - 50}{V_j}; \quad \tau_{Nj} = \frac{Q_N}{\Gamma_j},$$

де L_{no} - довжина приймально-відправних колій станцій; Q_N - норма маси складу для напрямку.

Характер взаємозв'язку Q , L і τ , що відповідає співвідношенням (14), ілюструють графіки рис. 5, де Q_{nj} маса поїзда повного складу для j -го призначення; $\bar{\Gamma}_j$ і $\underline{\Gamma}_j$ найбільше і найменше значення вантажопотоку призначення.

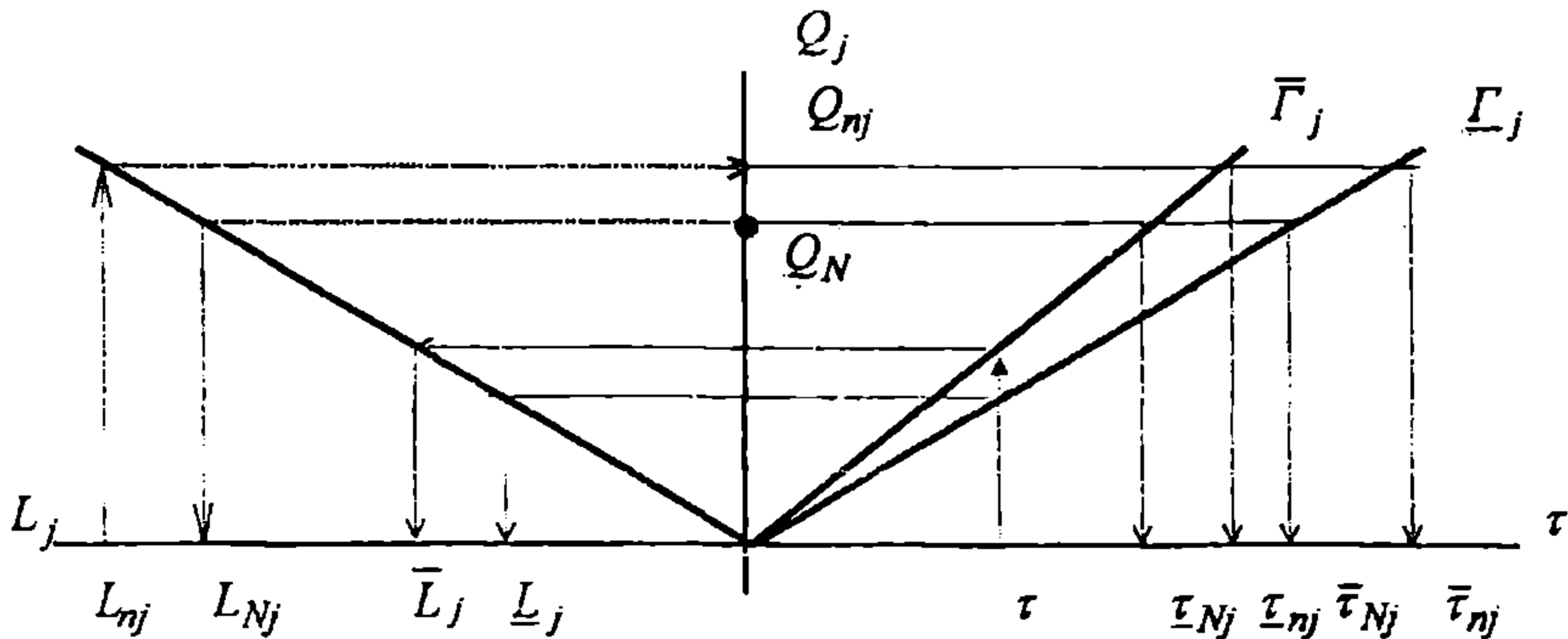


Рисунок 5 - Залежність маси і довжини складу від тривалості процесу формування.

Інтервалу варіації вантажопотоку $\Gamma_j \in [\underline{\Gamma}_j, \bar{\Gamma}_j]$ відповідають: інтервал тривалості процесу формування $[\underline{\tau}_{nj}, \bar{\tau}_{nj}]$ і довжина L_{nj} повноскладних поїздів, інтервал тривалості процесу формування $[\underline{\tau}_{Nj}, \bar{\tau}_{Nj}]$ і довжина L_{Nj} поїздів які

мають масу встановленої норми.

Заданій тривалості процесу формування τ відповідає інтервал варіації маси поїзда $[\underline{Q}_j, \bar{Q}_j]$ й інтервал зміни довжини поїзда $[\underline{L}_j, \bar{L}_j]$

Норма маси Q_N призначається для напрямку і може виявитися більшою маси поїзда повного складу для конкретного призначення Q_{nj} . У цьому випадку $L_{Nj} > L_{nj}$, тому при визначенні розподілу $f_Q(t)$ для таких призначень варто прийняти $Q_N = Q_{nj}$

При формуванні кожного окремо взятого поїзда при заданому τ значення Γ_j є невизначеним. Його можна моделювати випадковою величиною, що має функцію розподілу $F_{\Gamma_j}(y)$ при $y \in [\underline{\Gamma}_j, \bar{\Gamma}_j]$. Функція розподілу маси поїздів $F_{Q_j}(y)$ визначається як

$$F_{Q_j}(y) = \left\{ \begin{array}{ll} F_{\Gamma_j}(y/\tau) & \text{при } 0 < \tau \leq \underline{\tau}_{Nj} \\ \left\{ \begin{array}{ll} F_{\Gamma_j}(y/\tau) & \text{при } y \leq Q_N \\ 1 & \text{при } y > Q_N \end{array} \right\} & \text{при } \underline{\tau}_{Nj} < \tau \leq \bar{\tau}_{Nj} \\ \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{при } Q < Q_N \\ 1 & \text{при } Q \geq Q_N \end{array} \right\} & \text{при } \tau > \bar{\tau}_{Nj} \end{array} \right\} \quad (15)$$

Вантажопотік поїздного напрямку, його структура і швидкість формування довжини составів рівні:

$$\Gamma = \sum_{j=1}^n \Gamma_j; \quad \alpha_j = \Gamma_j / \Gamma; \quad V = \Gamma \sum_{j=1}^n \alpha_j L_j$$

При сталій структурі вантажопотоку і незалежності вантажопотоків призначень функція розподілу вантажопотоку напрямку являє собою суперпозицію вантажопотоків призначень.

Маса, довжина і тривалість формування поїзда пов'язані співвідношеннями:

$$Q = \Gamma \tau; \quad L = V \tau, \quad Q = PL,$$

де середнє значення поїздного погонного навантаження для напрямку

$$P = 1 / \sum_{j=1}^n \alpha_j L_j$$

Закон розподілу маси поїздів для напрямку можна одержати так, як і для призначення, замінивши у формулах (15) функцію розподілу вантажопотоку призначення на функцію розподілу вантажопотоку напрямку.

У дисертації побудована математична модель взаємозв'язку норми маси і середньої маси поїздів на напрямку, що дозволяє визначити розміри руху при урахуванні обмеження маси поїздів заданою тривалістю процесу їхнього

формування.

У п'ятому розділі приведено розв'язок задачі раціональної стратегії переходу залізниць на новий ряд потужності вантажних електровозів.

При розв'язанні задачі раціонального розподілу поставок у якості параметрів оптимізації прийняті витрати на відновлення заданого обсягу електровозного парку z_1 і тривалість виконання поставок z_2 .

У математичному плані задача формулюється так:

$$z_1(X) \rightarrow \min; \quad z_2(X) \rightarrow \min$$

$$\text{при } X = \left\{ (x_{ij}) : x_{ij} \geq 0; \sum_{i=1}^n x_{ij} \geq M_j, j = \overline{1, m}; i = \overline{1, n} \right\},$$

де M_j обсяг поставки електровозів j -го типу; n кількість заводів постачальників; m - кількість потрібних типів електровозів; x_{ij} - обсяг поставки i -м заводом електровозів j -го типу.

Для $z_1(X)$ й $z_2(X)$ отримані залежності:

$$z_1(X) = \sum_{j=1}^m \langle P_j X_j \rangle; \quad z_2(X) = \max_{1 \leq j \leq m} \left\{ \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{x_{ij}}{u_{ij}} \right\} \right\}, \quad (16)$$

де елементи векторів $P_j = (p_{ij})$ і $X_j = (x_{ij})$, $i = \overline{1, n}$ являють собою вартості p_{ij} й обсяги постачань x_{ij} електровоза j -го типу i -м заводом; u_{ij} - продуктивність i -го заводу по електровозу j -го типу.

З залежності (16) випливає, що задача раціонального розподілу замовлень на постачання m типів електровозів серед n заводів розпадається на m самостійних задач (основних) про раціональний розподіл замовлень на постачання M_j електровозів j -го типу між заводами:

$$z_{1j} = \langle P_j X_j \rangle \rightarrow \min; \quad z_{2j} = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{x_{ij}}{u_{ij}} \right\} \rightarrow \min$$

за умов: $\langle X_j, 1 \rangle \geq M_j, x_j \geq 0, j = \overline{1, m}$.

Розв'язок основної задачі розподілу постачань (при фіксованому j) у просторі перемінної X_j отримано у вигляді функції параметра $\alpha_j \in [0, 1]$.

$$X_j(\alpha_j) = \frac{\alpha_j M_j}{\sum_{i=1}^n u_{ij}} \begin{pmatrix} u_{1j} \\ u_{2j} \\ \vdots \\ u_{nj} \end{pmatrix} + (1 - \alpha_j) M_j \begin{pmatrix} e_{1j} \\ e_{2j} \\ \vdots \\ e_{nj} \end{pmatrix}, \quad \alpha_j \in [0, 1], \quad (17)$$

де вектор e_{ij} відмінний від нуля тільки при такому i_0 , котрому відповідає вартість $p_{i_0j} = \min\{p_{ij}\}$

НТБ
ДНУЗТ

Параметри оптимізації подані як функції α_j .

$$z_{1j}(\alpha_j) = \frac{\alpha_j M_j}{\sum_{i=1}^n u_{ij}} \langle P_j, U_j \rangle + (1 - \alpha_j) M_j P_{i_0j};$$

$$z_{2j}(\alpha_j) = M_j \left(\frac{\alpha_j}{\sum_{i=1}^n u_{ij}} + \frac{1 - \alpha_j}{u_{i_0j}} \right), \quad (18)$$

де U_j - вектор продуктивностей заводів по j -му типу електровоза.

Залежності (16) - (18) дозволяють вихідну задачу від $n \times m$ змінних x_{ij} звести до задачі відображення від m змінних α_j і подати z_1 й z_2 у виді:

$$z_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = \sum_{j=1}^m z_{1j}(\alpha_j);$$

$$z_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = \max_{1 \leq j \leq m} \{z_{2j}(\alpha_j)\}$$

за умови $\alpha_j \in [0, 1]$, $j = \overline{1, m}$, тобто дають можливість одиничний куб розмірності m , що являє собою множину Парето в просторі параметрів $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$, відбити в простір функціоналів z_1 і z_2 , як показано на рис. 6.

Приведено також розв'язок задачі розподілу постачань з урахуванням вимоги цілочисельності x_{ij} і M_j .

Розв'язок основної задачі розподілу поставок відповідає умовам стабільної економіки або випадку, коли тривалість переходу на нову техніку невелика. Якщо тривалість переходу складає декілька років, то при визначенні пов'язаних із відновленням електровозного парку витрат необхідно враховувати вплив чинника часу. З цією метою витрати на постачання електровозів за час $[t_1, t]$ приводяться до початку фінансування:

$$z_1(t) = \int_{t_1}^t \sum_{i=1}^n p_i(\tau) u_i(\tau) e^{-\alpha(\tau-t_1)} d\tau, \quad i = \overline{1, n},$$

де $p_i(\tau)$ і $u_i(\tau)$ - матеріальні витрати на відрізок часу $[\tau, \tau + d\tau]$; α - величина, що характеризує часовий дисконт.

Для розв'язку задачі використана ідея принципу максимуму Л.С. Понтрягіна. Ціль задачі складається у визначенні такого керування постачаннями $u_i(t)$, що забезпечує перехід із стану $z_1(0) = 0$ і $z_2(0) = 0$, де z_2 - кількість поставлених електровозів, у стан $z_2(T) = M$ при мінімізації функціонала $J[u] = z_1(T)$.

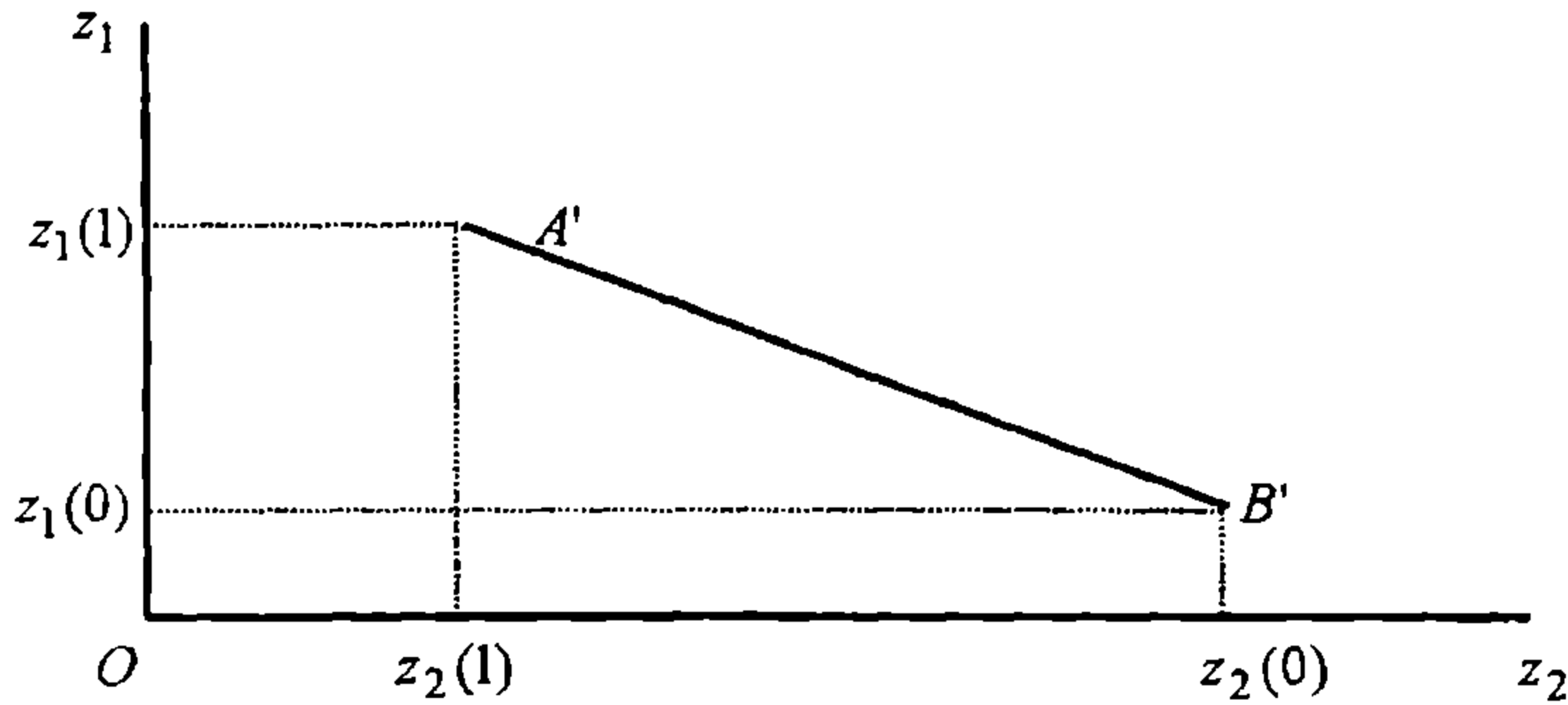


Рисунок 6 - Відображення розв'язку задачі розподілу поставок в просторі функціоналів.

Якісне дослідження задачі в термінах $u_i(t)$ показало, що для досягнення вибраної цілі замовлення повинні розподілятися в першу чергу між заводами із мінімальною ціною техніки, а сумарні обсяги поставок повинні нарощуватись до кінця переходу на новий рухомий склад. Тому, пронумерувавши заводи так, щоб $p_1 \leq p_2 \leq p_3 \leq \dots \leq p_n$, де n - число заводів, для приведених витрат z_1 і кількості випущених електровозів z_2 можна записати:

$$\frac{dz_1}{dt} = \left(\sum_{i=1}^k p_i \bar{u}_i + \sum_{i=k+1}^n p_i u_i \right) e^{-\alpha t}; \quad \frac{dz_2}{dt} = \underline{u} + \sum_{i=k+1}^n u_i,$$

де $k < n$ - номер заводу, для якого виконується умова $\underline{u} = M/T = \sum_{i=1}^k \bar{u}_i$

Функція Гамильтона - Понтрягіна

$$H = \psi_1 \left(\sum_{i=1}^k p_i \bar{u}_i + \sum_{i=k+1}^n p_i u_i \right) e^{-\alpha t} + \psi_2 \left(\underline{u} + \sum_{i=k+1}^n u_i \right).$$

Похідні $\partial H / \partial z_1 = 0$ і $\partial H / \partial z_2 = 0$, тому: $\psi_1 = \text{const}$; $\psi_2 = \text{const}$.

Функція Лагранжа має вигляд

$$L = J[u] - \lambda z_2[T],$$

тому $\psi_1 = -1$ і $\psi_2 = \lambda$, а оптимальне керування

$$u_i^{opt} = \begin{cases} 0, & \text{если } (\lambda - p_i e^{-\alpha t}) < 0; \\ \bar{u}_i, & \text{если } (\lambda - p_i e^{-\alpha t}) > 0. \end{cases}$$

Час переключення на $\bar{u}_i$ визначається по формулі

$$t_i = \frac{\bar{u}T - M - \frac{1}{\alpha} \sum_{v=k+1}^n \bar{u}_v \ln p_v}{\bar{u} - \underline{u}} + \frac{1}{\alpha} \ln p_i, \quad i = \overline{k+1, n}, \quad \text{де } \bar{u} = \sum_{i=1}^n \bar{u}_i,$$

а витрати на оновлення парку

$$z_1(T) = \frac{1}{\alpha} \left[(1 - e^{-\alpha T}) \sum_{i=1}^k p_i \bar{u}_i + \sum_{i=k+1}^n p_i \bar{u}_i (e^{-\alpha t_i} - e^{-\alpha T}) \right].$$

Приведено розв'язок задачі раціонального формування електровозного парку, цілпо якої є вибір моментів часу і значень керуючих впливів (поставок) $\{u(t_i)\}$, що мінімізують збитки, обумовлені нестачею або надлишком електровозів у порівнянні з їх потрібним числом.

Стан електровозного парку моделюється графом, поданим на рис. 7, де S_k - стан, що відповідає числу k працездатних електровозів; μ_k і λ_k - інтенсивності переходів зі стану S_k в S_{k+1} і зі стану S_k в S_{k-1} .

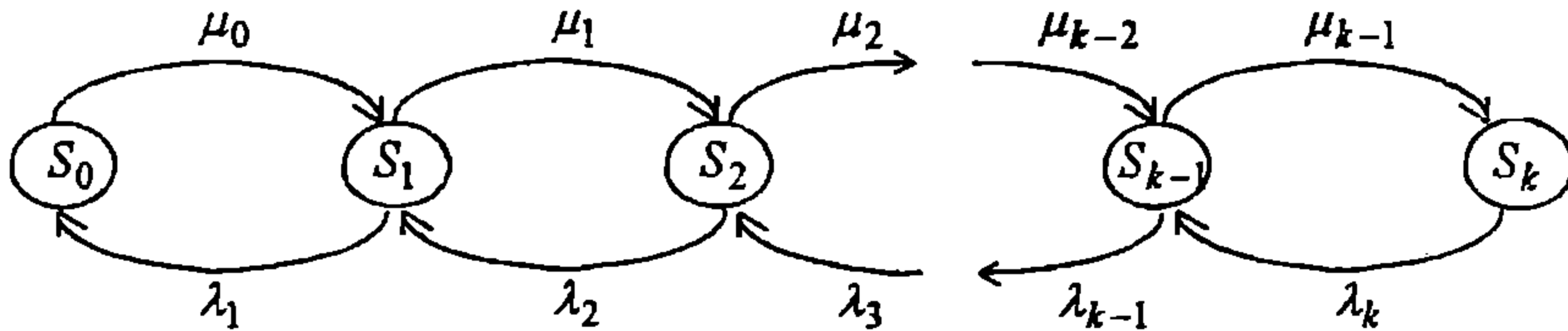


Рисунок 7 - Граф можливих станів електровозного парку.

Значення μ_k і λ_k визначаються як:

$$\mu_k = (N - k)\mu, \quad \mu = 1/t_{рем}, \quad k = \overline{0, N-1}, \quad \lambda_k = \lambda k; \quad \lambda = 1/t_{отк}, \quad k = \overline{1, N},$$

де N - загальна чисельність електровозного парку; k - число справних електровозів; $t_{рем}$ і $t_{отк}$ - час відновлення (ремонт) електровоза і напрацювання на відмову.

У припущенні про сталість λ і μ запропоновано рекурентне співвідношення

$$H_i = \frac{\rho}{1 + \rho} N_i + \left(H_{i-1}^* - \frac{\rho}{1 + \rho} N_i \right) e^{-(\lambda + \mu)\Delta t_i}, \quad i = \overline{1, k}, \quad (19)$$

де N_i - чисельність парку на початок часу Δt_i між i -ю і $i+1$ -ю поставками; $\rho = \mu/\lambda$ - коефіцієнт, що характеризує стан ремонтної бази; H_{i-1}^* і H_i - середня чисельність працездатних електровозів на початок і кінець інтервалу Δt_i .

Значення N_i і H_{i-1}^* рівні:

$$N_i = N_{i-1} + u_i, \quad i = \overline{1, k}; \quad H_{i-1}^* = H_{i-1} + u_i, \quad i = \overline{1, k}, \quad (20)$$

де k - число поставок за період, що розглядається.

НТБ
ДНУЗТ

Співвідношення (19) і (20) дають можливість по заданому керуванню поставками $\{u_i(t_i)\}$ розрахувати залежність числа працездатних електровозів від часу $H(t)$.

Збитки, обумовлені розбіжністю $H(t)$ і числа потрібних електровозів $M(t)$, надані у вигляді функціонала

$$J = \int_0^T [(C_+ + C_-)\sigma[H(t) - M(t)] - C_-][H(t) - M(t)]dt, \quad (21)$$

де T - тривалість періоду постачання; C_+ і C_- - збитки в одиницю часу на один відповідно "надлишковий" і "відсутній" електровоз; $\sigma(x)$ - одинична функція, рівна 1 при $x > 0$ і 0 при $x \leq 0$.

Аналітичне подання математичної моделі стану електровозного парку у виді (20) дозволяє при заданих початкових умовах $[N(0), H(0), J(0) = 0]$, відомих обсягах поставок u_i і кількості потрібних електровозів M_i оформити обчислення у вигляді процедури, зображеної на рис. 8.

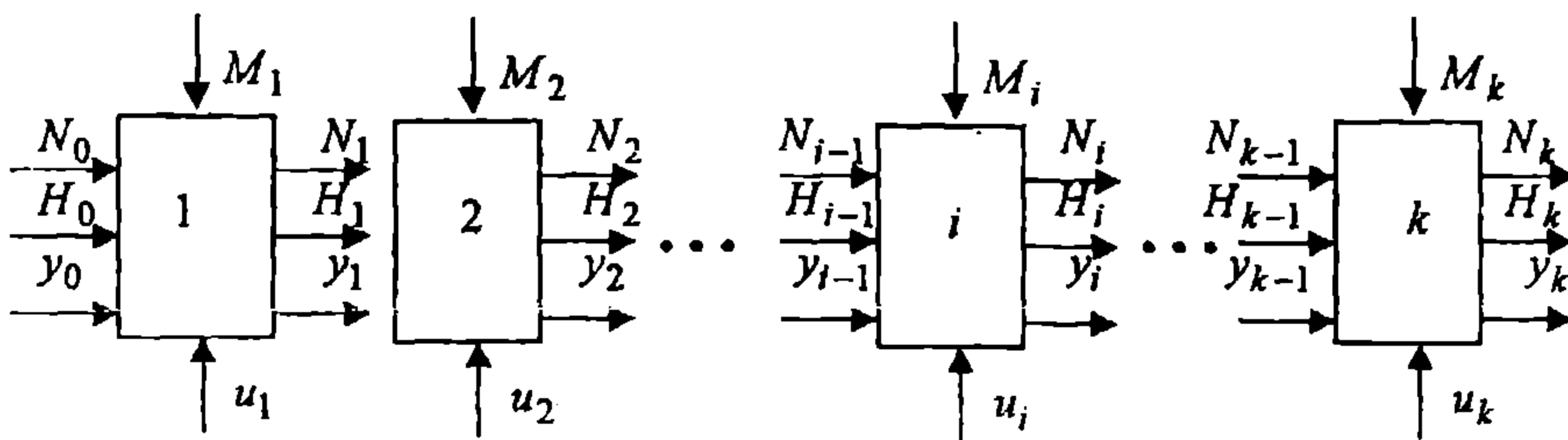


Рисунок 8 - Блок-схема моделі керування розмірностями.

Збитки $y = J[u]$ являють собою однозначну, але не диференційовану функцію керуючих впливів, тому для її мінімізації використано метод здатного деформуватися багатогранника, який не потребує диференційованості функції, що досліджується. На підставі запропонованої математичної моделі стану електровозного парку розроблено програму, що дозволяє при заданій потребі працездатних електровозів визначити обсяг поставок, які мінімізують збитки зумовлені нестачею або надлишком працездатних електровозів.

У шостому розділі приведені результати визначення основних зовнішніх параметрів і раціональної потужності електровозів для забезпечення вантажних перевезень на залізницях України.

На підставі запропонованих методик і математичних моделей побудовані алгоритми і пакети прикладних програм для визначення оптимальних значень номінальної потужності електровозів.

Розрахунки виконані для ділянок обертання, на яких виконується більш 80 % перевізної роботи. Вони визначені за результатами аналізу статистичних даних,

що характеризують вантажообіг електрифікованих ліній залізниць.

Шляхом реалізації запропонованого в дисертації одноваріантного алгоритму двохпараметричної оптимізації тягових розрахунків визначені залежності мінімальної витрати електроенергії на тягу поїздів від ходової швидкості $a_i^{\min}(V_x | V_p = V_{pj})$, $i = \overline{1, n}$ на інтервалі розрахункової швидкості $[30, 70]$ км/г.

Характер взаємного розташування кривих $a_i^{\min}(V_x)$ для всіх ділянок близька до поданого на рис. 9. Тому з позиції прийнятих показників оптимальності вибору потужності електровоза розрахункову швидкість доцільно прийняти рівною мінімальному значенню V_p^{opt} , достатньому для забезпечення заданої ходової швидкості V_{xz} , а залежність $V_p^{opt}(V_x)$ повинна визначатися за результатами тягових розрахунків, що відповідають керуванню по швидкодії.

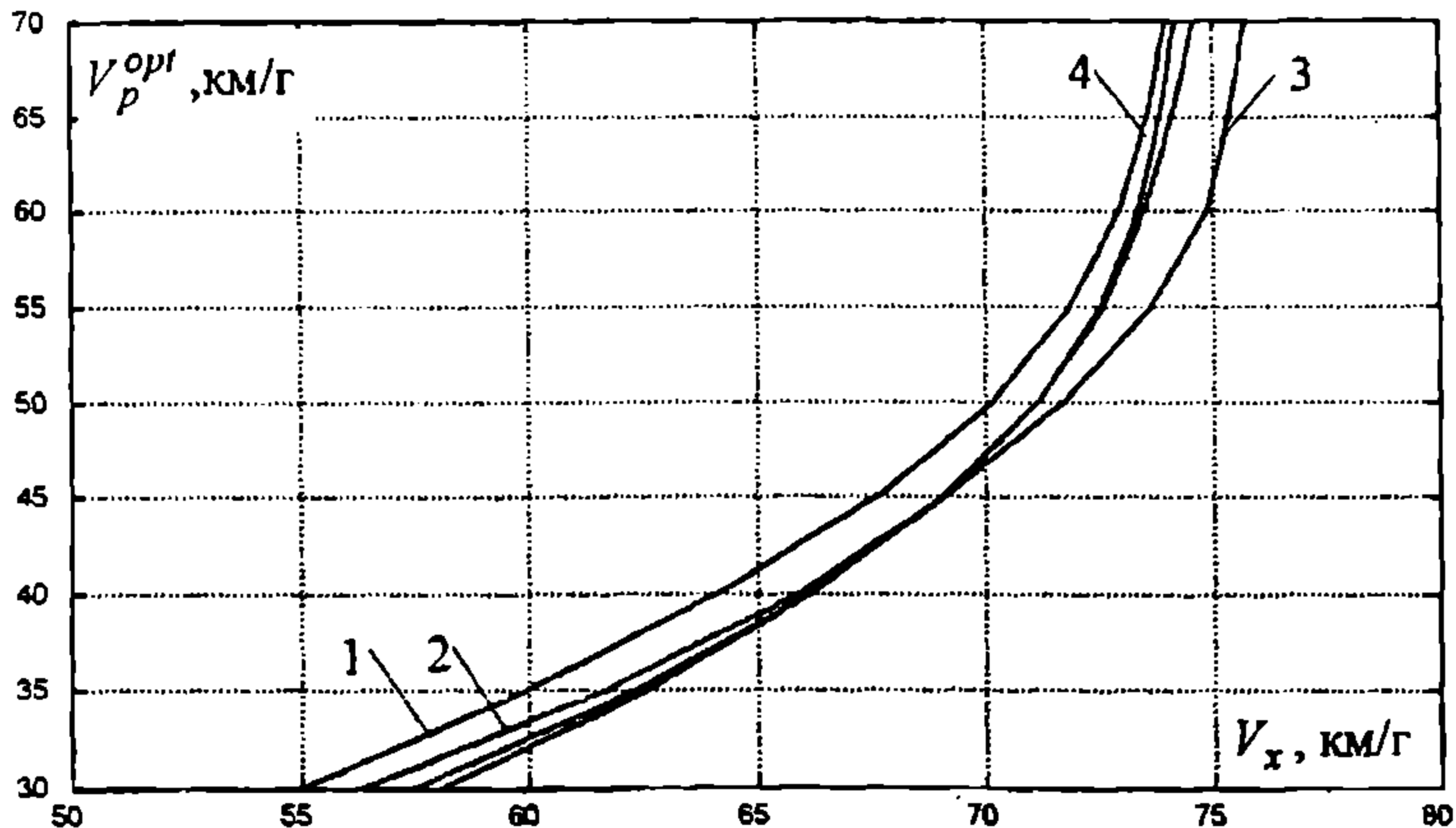
Різним ділянкам обертання відповідають різні (див. рис. 10) криві $V_p^{opt}(V_x)$, оскільки їхній характер визначається характеристиками ділянки (особливості профілю ділянки, рівень встановлених обмежень швидкості, розташування роздільних пунктів і відстані між ними і т.д.). У зв'язку з цим розрахункова швидкість електровозів, призначених для здійснення перевезень на полігоні тяги що складається з k ділянок обертання (з урахуванням парного і непарного напрямків руху), визначається як

$$V_p^{пол} = \max \{ V_p^{opt} | V_{xz} = V_{xz} \}, i = \overline{1, k}.$$



Рисунок 9 - Взаємне розташування залежностей $a_i^{\min}(V_x)$.

НТБ
ДНУЗТ



1 - Миронівка - Знам'янка; 2 - Знам'янка - Пятихатки;
3 - Пятихатки - Знам'янка; 4 - Знам'янка - Миронівка.

Рисунок 10 - Залежність оптимальної розрахункової швидкості вантажних електровозів від ходової швидкості.

У результаті виконаних досліджень встановлено, що для перспективних вантажних електровозів із плавним регулюванням потужності раціональна розрахункова швидкість складає 43-48 км/г, а для електровозів постійного струму з резисторним пуском - 50-52 км/г. Зазначені значення V_p встановлені з умови можливості реалізації ходової швидкості 60-65 км/г, що відповідає дільничій швидкості 50-52 км/г, при резервуванні потужності в розмірі 15 % від мінімально припустимого значення.

Розподіл потрібної номінальної потужності електровозів визначено за даними статистичного аналізу фактичної маси поїздів. Статистичні вибірки проведені за результатами роботи залізниць України за 1997-1999 р.

Аналіз показав, що розподіл маси поїздів для різноманітних ділянок обертання не може бути описано законом одного типу, тому в дослідженні використовуються емпіричні розподіли у вигляді гістограм.

Отримані статистичні дані дозволили оцінити ступінь відповідності зовнішніх параметрів вантажних електровозів, що експлуатуються, параметрам перевізного процесу залізниць України. Показано, що потужність електровозів ВЛ 8 нижче необхідної для тяги поїздів встановленої норми маси на Придніпровській та Донецькій залізницях.

Для більшості ділянок полігона електричної тяги змінного струму потужність електровозів серії ВЛ 80 (всіх індексів) істотно перевищує потрібний рівень, що негативно позначається на техніко-економічних показниках перевізного процесу.

Потужність електровозів ВЛ 11^М, які експлуатуються на основному ході Львівської залізниці (ділянка Львов-Мукачево-Чоп), відповідає встановленим графіковим нормам маси при існуючому порядку водження поїздів.

На підставі запропонованих моделей взаємозв'язку надлишкової потужності і кратності тяги для випадку дискретного розподілу потрібної потужності розроблено алгоритм визначення Парето оптимальних розв'язків задачі вибору градації потужності електровозів.

Алгоритм реалізовано на ПЕВМ Pentium 200 для випадку, коли можуть використовуватися два тягових модулі різної потужності.

Отримано розв'язок задачі для ділянок обертання крупних електровозних депо (Н-Д-Вузол, Котовськ, Знам'янка, Козятин, Конотоп, Червоний Лиман, Ясиновата) і окремих залізниць. Вироблено рекомендації на вибір потужності вантажних електровозів для полігонів тяги постійного струму (Придніпровська, Донецька і Південна залізниця) і змінного струму (Південно-Західна й Одеська залізниця), а також для Львівської залізниці, що відрізняється складним планом і важким профілем колії.

Оптимальні по Парето комбінації надлишкової потужності і кратності тяги (K), а також надлишкової потужності і потужності тягового модуля (X) мають вид графіків рис. 11 і 12, де d подає надлишкову потужність, виражену у відсотках від середнього значення потрібної потужності.

Аналіз виконаних розрахунків показав, що для полігона тяги змінного струму експлуатація електровозів серії ВЛ 80, що мають потужність 5960 кВт, обумовлює надлишок потужності, рівний приблизно 45 % від мінімальної потрібної величини. На даному полігоні при існуючій організації перевізного процесу раціональна потужність тягового модуля складає 2900 - 3000 кВт, що відповідає ряду потужностей 2900 - 3000 и 5800 - 6000 кВт. У випадку заміни електровозів серії ВЛ 80 тяговими зчепами раціональної потужності надлишкова потужність зменшиться приблизно вдвоє, а кратність тяги складе $K = 1,72$. Для комплектації 100 розрахункових одиниць електровозного парку потрібно ввести в експлуатацію 172 тягових модуля (78 двохмодульних і 28 одномодульних зчеп), що в порівнянні з випадком експлуатації двохсекційних електровозів, як практикується в даний час, дає економію 14 % капітальних витрат на відновлення парку.

На полігоні тяги постійного струму раціональна потужність тягового модуля складає 2800 - 3100 кВт, а раціональний ряд потужності складають тягові зчепи потужністю 2800 - 3100, 5600 - 6200 і 8400 - 9300 кВт. При потужності модуля 3100 кВт 100 розрахункових одиниць електровозного парку повинні складати: 12 одномодульних, 77 двохмодульних і 11 трьохмодульних тягових зчепів. Кратність тяги складе $K = 1,99$. У порівнянні з варіантом експлуатації двохсекційних електровозів потужністю 6200 кВт застосування тягових модулів потужністю 3100 кВт обумовить економію 11 % витрат на оновлення парку вантажних електровозів.

Умовам тяги поїздів на Львівській залізниці відповідає варіант використання тягового модуля потужністю 4500 кВт, а раціональний ряд потужності складають три градації: 4500, 9000 та 13500 кВт.

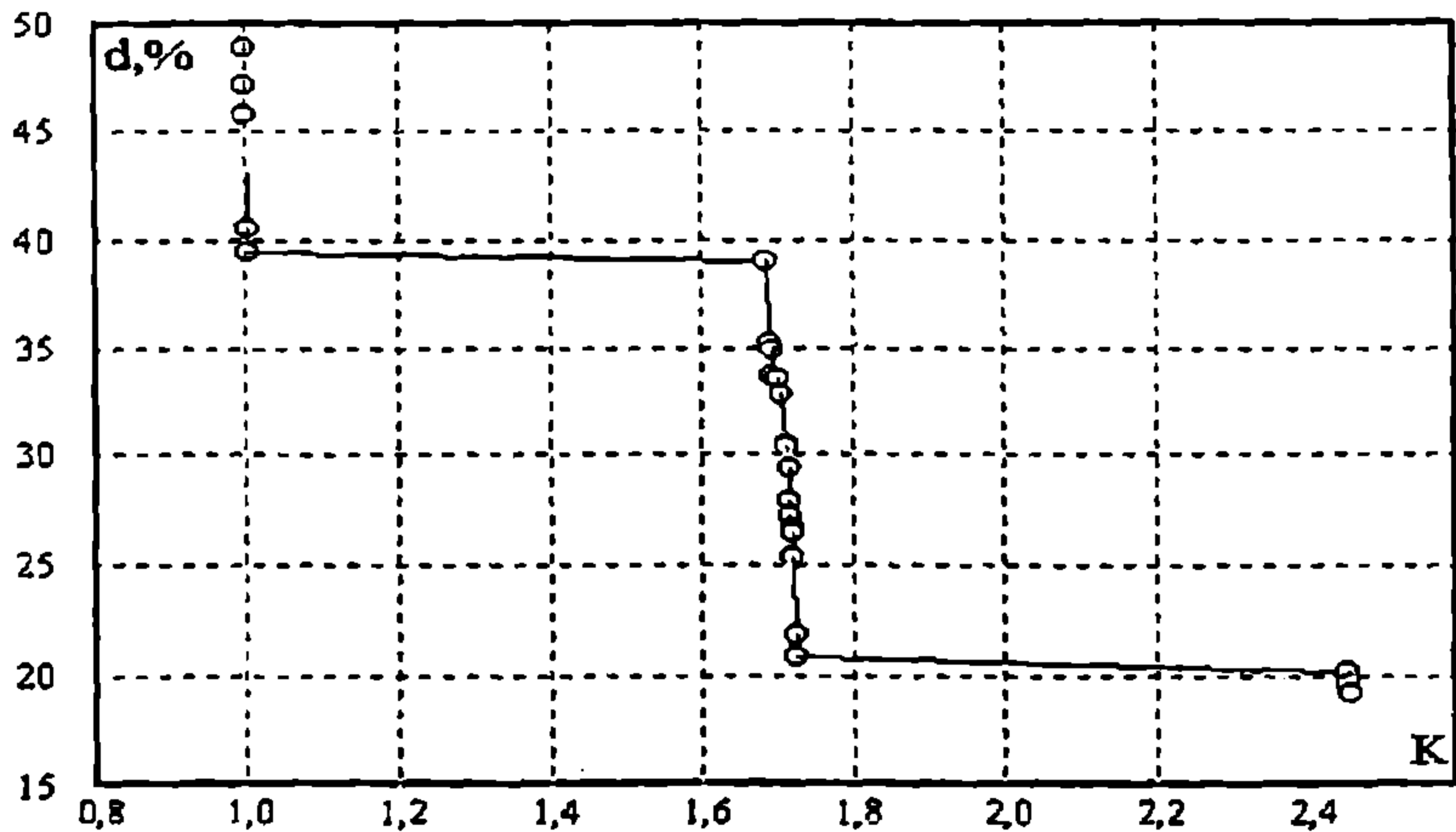


Рисунок 11 - Залежність відносного розміру надлишкової потужності тягового зчепу від кратності тяги на ділянках обертання залізниць України, електрифікованих на змінному струмі.

Використання для вантажних перевезень тягових модулів оптимальної потужності дозволяє як показали розрахунки і результати експлуатаційних випробувань дослідної партії електровозів ДЕ1 у депо Нижньодніпровск-Вузол, знизити витрату електроенергії на тягу поїздів на 5-10 %.

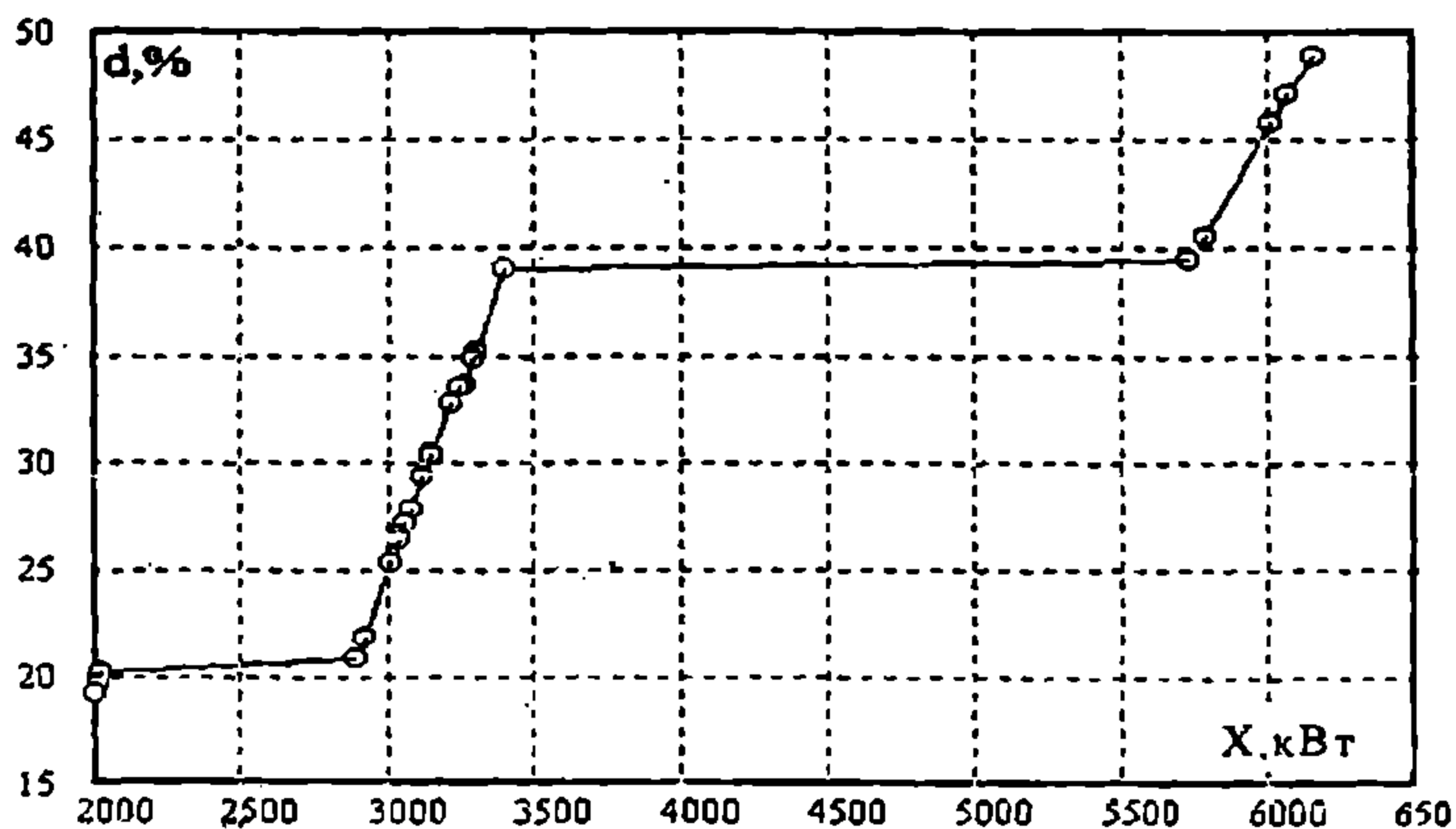


Рисунок 12 - Залежність відносного розміру надлишкової потужності тягового зчепу від потужності тягового модуля на ділянках обертання залізниць України, електрифікованих на змінному струмі

У додатках приведені статистичні дані, що характеризують розподіл вантажообігу між поїздо-ділянками залізниць України, гістограми розподілу оптимальних потрібних потужностей, результати тягових розрахунків і розрахунків по визначенню оптимальної градації потужності вантажних електровозів, які не ввійшли в основний текст дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на базі виконаних теоретичних досліджень розроблені наукові основи розв'язку важливої науково-технічної проблеми вибору раціонального ряду потужностей вантажних електровозів і оптимальної стратегії оновлення локомотивного парку. Приведені в дисертації результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Існуючі методики розв'язання задач тягового забезпечення не дозволяють вирішувати задачі оновлення електровозного парку з урахуванням особливостей функціонування залізничного транспорту в умовах ринкових економічних відносин.

2. Запропоновано методику визначення оптимальної по мінімуму витрат електроенергії і часу руху номінальної потужності вантажних електровозів.

3. Розроблено універсальні граничні тягові і тягово-енергетичні характеристики електрорухомого складу. Запропоновано математичну модель руху поїзда, що дозволяє виконати тягові розрахунки при розв'язанні задач тягового забезпечення, коли тягові і струмові характеристики електрорухомого складу не задані.

4. На основі методів векторної оптимізації розроблено одноваріантний алгоритм оптимізації тягових розрахунків по мінімуму витрат енергії і часу ходу поїзда, застосування якого дозволило встановити, що для залізниць України раціональне значення розрахункової швидкості перспективних вантажних електровозів із плавним регулюванням потужності складає 43 – 48 км/г, а для електровозів постійного струму з резисторним пуском - 50 - 52 км/г.

5. Отримано оцінки відповідності параметрів електровозів, що експлуатуються, умовам існуючої організації перевізного процесу на залізницях України.

6. Розроблено методики й алгоритми визначення раціональної градації потужності електровозів, засновані на використанні відношення переваги Парето. На базі запропонованих алгоритмів створені і передані для практичного використання Головному управлінню локомотивного господарства Укрзалізниці пакети прикладних програм розв'язання задач тягового забезпечення.

7. Визначено раціональні значення номінальної потужності тягового модуля і раціональні ряди потужності тягових зчелів для полігонів тяги залізниць України. Для полігона тяги постійного струму раціональна потужність тягового модуля

знаходиться в межах 2900-3100 кВт, а раціональний ряд потужності включає три градації: 2900-3100 кВт; 5800-6200 кВт; 8400-9300 кВт.

Раціональний ряд потужності електровозів змінного струму складають дві градації потужності: 2800-3000 кВт; 5600-6000 кВт (при потужності тягового модуля 2800-3000 кВт).

На ділянках Львівської залізниці, які електрифіковано на постійному струмі, доцільне використання тягових модулів потужністю 4500 кВт, а раціональний ряд потужності має три градації: 4500 кВт; 9000 кВт; 13500 кВт.

8. Розроблено математичну модель характеристик джерел, вантажопотоків, яка дозволяє визначити на перспективу розміри руху і параметри законів розподілу імовірностей маси поїздів та потрібної потужності електровозів з урахуванням обмеження тривалості процесу формування поїздів.

9. Запропоновано методику розрахунку раціонального переходу на новий тяговий рухомий склад. Розроблено математичні моделі для визначення раціональних обсягів постачань (списання) і розподілу замовлень на виготовлення електровозів між заводами.

10. Виконано аналіз вантажопотоків залізниць України, за результатами якого визначені закони розподілу частот маси поїздів і необхідної потужності вантажних електровозів, що складають основу для розв'язання задач тягового забезпечення.

11. Впровадження в експлуатацію тягових зчепів, які сформовано з однотипних модулів раціональної потужності, забезпечує зниження витрат на оновлення парку вантажних електровозів постійного і змінного струму відповідно на 10 і 14 %, а також зменшення витрат електроенергії на тягу поїздів на 5 - 9 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ З ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гетьман Г.К. Выбор оптимальных параметров перспективных электровозов для грузового движения // Залізничний транспорт України. – 2000. - № 3 –С. 47-51.
2. Гетьман Г.К. Универсальные тягово-энергетические характеристики электроподвижного состава // Придніпровський науковий вісник (технічні науки). -1998 (листопад). -№ 105(172). -С. 46-55.
3. Гетьман Г. К. Моделирование ограничений области допустимых управлений уравнения движения поезда в задачах тягового обеспечения // Вісник Харківського державного політехнічного університету. 36. наук. пр. Випуск 85. – Харків: ХДПУ, 1999. –С. 44 + 51.
4. Гетьман Г.К. Математическая модель поезда для производства тяговых расчетов в задачах выбора параметров тяговых средств // Транспорт: 36. наук. пр. Випуск 1. –Дніпропетровськ: Наука і освіта, 1999. –С. 75-79.

5. Гетьман Г.К. Определение оптимальной по минимуму расхода энергии на движение поезда мощности локомотива // Напівпровідникові та мікропроцесорні пристрої в електроенергетичних системах транспорту. Зб. наук. пр. Випуск 39. – Харків: ХарДАЗТ, 2000. – С. 41-48.
6. Босов А.А., Гетьман Г.К. Векторная оптимизация в задачах тяговых расчетов // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Зб. наук. пр. Випуск 73. – Харків: ХДПУ, 1999. – С. 23-27.
7. Гетьман Г.К. Применение методов векторной оптимизации для решения задач тяговых расчетов // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Зб. наук. пр. Випуск 62. – Харків: ХДПУ, 1999. – С. 12-19.
8. Босов А.А. Гетьман Г.К. Параметризация в задачах векторной оптимизации // Транспорт. Зб. наук. пр. Випуск 5. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2000. – С. 62 - 65.
9. Гетьман Г.К. Определение оптимальной мощности тягового модуля для грузовых перевозок на электрифицированных линиях железных дорог Украины // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Зб. наук. пр. Випуск 111. – Харків: ХДПУ, 2000. – С. 21 – 36.
10. Гетьман Г.К. Оценка взаимосвязи массы, длины поезда и времени его формирования // Залізничний транспорт України. -1999. -№ 2. -С. 10-12.
11. Гетьман Г.К. Моделирование взаимосвязи средней массы и нормы массы поездов при ограничении времени формирования // Математичне моделювання в інженерних та економічних задачах транспорту. Зб. наук. пр. - Дніпропетровськ: Січ, 1999. - С. 168 - 176.
12. Гетьман Г.К. Определение оптимальной градации мощности электровозов для осуществления грузовых перевозок на заданной железнодорожной линии // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Зб. наук. пр. Випуск 49. – Харків: ХДПУ, 1999. – С. 30-35.
13. Гетьман Г.К. Метод расчета оптимальных мощностей тягового подвижного состава при дискретном распределении массы поездов // Інформаційно – керуючі системи на залізничному транспорті. – 1999. № 2. –С. 44 - 47.
14. Гетьман Г.К. Моделирование рационального парка технических объектов // Інформаційно – керуючі системи на залізничному транспорті. 1999. № 1. –С. 3-6.
15. Гетьман Г.К. Задачи рациональной стратегии обновления локомотивного парка Украины // Транспорт. Підвищення ефективності роботи приладів електричного транспорту: Міжвузівський зб. наук. пр. / Ред. кол.. Є.П. Блохін /гол. ред./ та ін. – Дніпропетровськ: Січ, 1999. – С. 22-26.
16. Гетьман Г.К. Определёние рационального распределения заказов на поставку локомотивов // Залізничний транспорт України. – 2000. № 1. -С.2-4.

НТБ
ДНУЗТ

17. Гетьман Г.К. Учет временного фактора в задачах распределения заказов на поставку локомотивов // Комунальне господарство міст. Науково-технічний зб. Випуск 19. – Київ: Техніка, - 1999. – 171-178.
18. Гетьман Г.К. Применение принципа максимума Л. С. Понтрягина для решения задачи рационального распределения заказов на поставку локомотивов // Вісник Харківського державного політехнічного університету Зб. наук. пр. Випуск 95. – Харків: ХДПУ, 2000. –С. 54 – 64.
19. Гетьман Г.К. Моделирование состояния локомотивного парка // Збірник наукових праць. Київський інститут залізничного транспорту. Том 3. –Київ: КІЗТ, 1999. –С. 106 – 114.
20. Гетьман Г.К. Оптимальное управление при формировании рационального парка локомотивов // Вісник Східноукраїнського державного університету. Випуск 5(27) - Луганськ: СУДУ, 2000. -С. 53-57.
21. Гетьман Г.К. Выбор градации мощности грузовых локомотивов // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Зб. наук. пр. Випуск 89. – Харків: ХДПУ, 2000. –С. 50-56.
22. Гетьман Г.К. Математические модели электроподвижного состава в задачах тягового обеспечения // Физико-технические и технологические приложения математического моделирования. Сб. науч. тр. НАН Украины. Ин-т математики. -Київ, 1998. -С. 48-51.
23. Гетьман Г.К. Моделирование взаимосвязи массы, длины и времени формирования грузовых поездов при заданных параметрах тяговых средств // Iужел The 5th International Scientific conference of railway experts. Vranska Banja (Yugoslavia), 1998. -С. 295 - 298.
24. Гетьман Г.К. Определение оптимальных параметров локомотивов для грузового движения // Тезисы междунар. теор. конф. "Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта" – Ростов-на-Дону, РИИЖТ, 1999. - С. 58.
25. Гетьман Г.К. Методика определения номинальной мощности грузовых электровозов // Тезисы IX междунар. науч.-техн. конф. "Проблемы развития рельсового транспорта" - Луганск: ВУГУ. - 1999. -С. 40-41.
26. Гетьман Г.К. Основы метода определения рационального мощностного ряда локомотивов // Тезисы VII междунар. научн.-техн. конф. "Проблемы развития рельсового транспорта" - Луганск: ВУГУ - 1997. -С. 26-27.

Гетьман Г.К. Наукові основи визначення оптимального ряду потужностей вантажних електровозів для залізниць України. - Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 - електротранспорт.

– Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту, Дніпропетровськ, 2001.

Захищається рукопис, у якому викладені науково-методичні основи і практичні рекомендації щодо вибору раціонального ряду потужностей вантажних електровозів і раціональної стратегії оновлення електровозного парку.

Викладається обґрунтування методики визначення оптимальної за умов мінімізації витрат енергії і часу на переміщення поїзда номінальної потужності електровоза, а також методик визначення оптимальної градації потужності вантажних електровозів і оптимальної стратегії оновлення електровозного парку.

Подано оцінку відповідності вимогам перевізного процесу параметрів електровозів, які експлуатуються на залізницях України.

Надано рекомендації відносно вибору оптимальної потужності тягового модуля для насичення експлуатованого парку новими електровозами.

Приведено економічну оцінку доцільності впровадження модульної тяги для виконання вантажних перевезень.

Ключові слова: електрифікована залізниця, парк електровозів, градація потужності електровозів, відновлення парку, оптимізація.

Гетьман Г.К. Научные основы определения оптимального мощностного ряда грузовых электровозов для железных дорог Украины. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт.

– Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 2001.

Диссертация посвящена разработке научно-методических основ и практических рекомендаций по выбору рационального мощностного ряда грузовых электровозов и рациональной стратегии обновления электровозного парка.

Для решения задачи выбора оптимальной градации мощности электровозов разработана методика определения оптимальной мощности при детерминированной массе состава и методика определения оптимальной градации мощности тягового модуля для полигона тяги с учетом различия

НТБ
ДНУЗТ

условий вождения поездов на отдельных направлениях полигона и стохастического характера массы поездов.

Обоснована целесообразность использования при определении законов распределения потребной мощности электровозов в качестве критериев оптимальности минимума расхода энергии и времени движения поездов. Решение задачи сводится к установлению оптимальной с точки зрения принятых критериев расчетной скорости электровоза, определяемой по результатам двухпараметрической оптимизации тяговых расчетов для заданного полигона тяги.

Разработана математическая модель движения поезда для производства тяговых расчетов в задачах тягового обеспечения, когда характеристики тяговых средств не конкретизированы. Она базируется на использовании предложенных в работе универсальных предельных тяговых характеристик и позволяет представить управляющие переменные в уравнении движения поезда в виде одной переменной – расчетной скорости. Для расчета расхода электроэнергии на тягу предложены определяющие к.п.д. электровоза универсальные тягово-энергетические характеристики.

Приведены результаты анализа возможности решения задач двухпараметрической оптимизации тяговых расчетов методами векторной оптимизации. Предложен эффективный одновариантный алгоритм оптимизации тяговых расчетов по минимуму расхода электроэнергии и времени движения поезда.

Разработана методика определения рациональной градации мощности грузовых электровозов. В качестве критериев оптимальности принимается минимум избыточной мощности и минимум кратности тяги, необходимой для формирования тяговых сцепов требуемой мощности из тяговых модулей. Предложен алгоритм решения задачи определения оптимальной мощности тягового модуля как задачи векторной оптимизации с представлением результатов решения совокупностью несравнимых по Парето вариантов соотношений избыточной мощности и кратности тяги. Рассмотрены случаи представления потребной оптимальной мощности электровозов в виде непрерывных и дискретных законов распределения.

Для расчетов на перспективу, когда необходимо учесть влияние фактора времени на распределение массы поездов, разработаны математические модели, позволяющие рассчитать параметры закона распределения оптимальной потребной мощности электровозов и размеры движения по заданным характеристикам грузообразующих источников с учетом ограничений, обусловленных параметрами технических средств и установленной продолжительностью формирования поездов.

Предложена методика определения параметров рационального перехода на новый подвижной состав, включающая математические модели по расчету рационального распределения поставок между поставщиками электровозов, рациональных объемов поставок и списания электровозов. Предложенные модели предусматривают возможность учета инфляционных процессов. Задачи рассмотрены с позиций векторной оптимизации и позволяют построить взаимосвязь между затратами средств на приобретение электровозов и затратами времени на реализацию данного перехода.

Выполнен расчет основных внешних параметров и рациональной градации мощности грузовых электровозов. Установлено, что на перспективу для реализации ходовой скорости грузовых поездов 60 - 65 км/ч оптимальная расчетная скорость электровозов с плавным регулированием мощности должна составлять 43 - 48 км/ч, а электровозов постоянного тока с резисторным пуском – 50 - 52 км/ч.

Приведены результаты анализа соответствия мощности эксплуатируемых на железных дорогах Украины электровозов параметрам перевозочного процесса, а также результат решения задачи определения оптимальной мощности тягового модуля для вождения поездов на участках обращения отдельных электровозных депо, отдельных железных дорог и страны. Выработаны рекомендации по выбору мощности грузовых электровозов для полигонов тяги, электрифицированных на постоянном и переменном токе.

Показано, что внедрение на железных дорогах Украины модульной тяги позволяет снизить капитальные вложения на приобретение новых электровозов на 10 - 14 % и целесообразно с позиций снижения расхода электроэнергии на тягу поездов и эксплуатационных расходов на содержание потребного парка электровозов.

Ключевые слова: электрифицированная железная дорога, электровозный парк, градация мощности электровозов, обновление парка, оптимизация.

Getman G.K. Scientific bases of definition optimum power of a number of cargo electric locomotives for railways of Ukraine. - Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the doctor of engineering science on a speciality 05.22.09 – electric transport.

– Dnepropetrovsk state technical university of a railway transportation, Dnepropetrovsk, 2001.

The manuscript is protected, in which the scientific - methodical bases and practical guidelines are explained at the choice of rational power of a number of cargo electric locomotives and rational strategy of upgrade of lokomotives park.

НТБ
ДНУЗТ

The substantiation of a technique of definition of distribution parameters optimum on a minimum of expenditures of energy and time for moving of a train of a rated power of the locomotive, and also techniques of definition of optimum gradation of power of cargo locomotives and optimum strategy of upgrade of lokomotives park is stated.

The outcomes of numerical calculations for an estimation of correspondence of parameters of Ukraine, maintained on iron roads, of electric locomotives to the requirements of the transportation process are parsed.

The guidelines are given at the choice of optimum power of the tractive unit for saturation of maintained park by new electric locomotives.

The economic estimation of expediency of implantation of modular traction is reduced at optimum power of the tractive unit.

Key words: electrified railway, park of electric locomotives, gradation of power of electric locomotives, renovation a parka, optimization.

Гетьман Геннадій Кузьмич

**НАУКОВІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО РЯДУ
ПОТУЖНОСТЕЙ ВАНТАЖНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ДЛЯ
ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Підписано до друку *18.04.2001* Формат 60x84 1/16. Папір для множних апаратів. Гарнітура Times New Roman Суг. Ум. друк. арк. 2,1. Обл.-видав. арк. 2,0. Тираж 100 прим. Зам. 208. Безкоштовно.

Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту.

Адреса університету та дільниці оперативної поліграфії ДІІТу: 49010, Дніпропетровськ, 10, вул. Акад. В.А. Лазаряна, 2.