

**Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

СКАЛОЗУБ ВЛАДИСЛАВ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 629.4.016.12.001.26

**РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ТЯГОЮ ПОЇЗДІВ
І УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ РУХОМОГО СКЛАДУ**

05.22.07 – Рухомий склад залізниць і тяга поїздів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ 2003

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту України

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор **Блохін Євген Петрович**,
завідувач кафедри будівельної механіки Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Браташ Віктор Олександрович**,
директор Українського науково-дослідного, проектно-конструкторського
та технологічного інституту електровозобудування, м. Дніпропетровськ;

доктор технічних наук, професор **Гетьман Геннадій Кузьмич**,
завідувач кафедри електрорухомого складу Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна;

доктор технічних наук, професор **Савоськін Анатолій Миколайович**,
професор кафедри електричної тяги Московського державного університету
шляхів сполучення, Росія.

Провідна організація:

Українська державна академія залізничного транспорту,
Міністерство транспорту України, м. Харків, кафедра локомотивів.

Захист відбудеться “ 24 ” листопаду 2003 р. о 14 годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 08.820.02 в Дніпропетровському національному
університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою:
49010, м. Дніпропетровськ, вул. Акад. Лазаряна, 2, зал засідань, к. 314.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Автореферат розісланий “ 22 ” жовтня 2003 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор

Жуковицький І.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту України в сучасних умовах потребує розв'язання ряду стратегічно важливих задач в галузях створення енергетично і економічно оптимальної, конкурентноспроможної технології процесу перевезень, забезпечення безпеки при підвищенні швидкості руху поїздів, розвитку і оптимізації систем управління усіх рівнів. Основою енергетичної політики залізничного транспорту України, спрямованої на виконання Указу президента України № 662/99 від 16 червня 1999 р., є ефективне використання електричної енергії та енергозбереження. Першочерговість указаних напрямків розвитку залізничного транспорту визначена програмами реструктуризації Укрзалізниці на 1998 – 2008 роки (п.п. 12.4, 19.8, 29.7), Наказом Укрзалізниці №583 – Ц від 29.10.2001 р. “Про заходи по впровадженню на залізничному транспорті України перспективних інформаційних технологій”, де також передбачено розробку науково ємних інформаційних технологій по управлінню рухом і тягою поїздів.

В сучасних умовах для залізниць України актуальним напрямком досліджень є проблема розрахунку оптимальних режимів тяги поїздів і режимних карт при урахуванні комплексу показників об'ємів перевезень і основних ресурсів (споживання і вартість електроенергії, швидкість і час руху по ділянках), а також при урахуванні умов неповноти інформації для розрахунків. Відзначимо, що задача управління режимами тяги за критерієм мінімуму вартості електроенергії при змінному тарифі (умови оптового ринку, диференційовані тарифи) є новою для залізниць України, оскільки режимні карти руху поїзда за показниками електроспоживання не відповідають оптимальності за вартісними показниками. Виникає потреба подальшого розвитку моделей і методів управління тягою за умов ефективного урахування усіх основних показників ресурсів складних систем залізниць.

Розв'язання ряду комплексних проблем по удосконаленню рухомого складу методами параметричної оптимізації конструкцій, спрямованих на підвищення критичних швидкостей сталого руху, по підвищенню екологічної безпеки за рахунок мінімізації збитків, можливих при виникненні аварійних ситуацій при перевезенні небезпечних рідин, програма “Безпека”, по забезпеченню ефективності перевезень і збереженню рухомого складу за рахунок дослідження і обґрунтованого нормування умов перевезень окремих видів вантажів, зокрема труб та інше, може бути досягнуто на основі розвитку та застосування засад векторної оптимізації наборів показників, які характеризують ресурси конструкцій рухомого складу та їх елементів.

Актуальним напрямком розвитку систем управління залізничного транспорту та засобом побудови більш адекватних математичних моделей для розрахунку режимів тяги поїздів є удосконалення методів аналізу даних сучасних інформаційних систем Укрзалізниці, які характеризують сукупні властивості процесу перевезень.

Таким чином, розвиток теоретичних і методичних засад, які забезпечують ефективне рішення багаторівневих задач управління процесом перевезень і розрахунку режимів тяги поїздів, задач по удосконаленню конструкцій рухомого складу з урахуванням вектора показників ресурсу є актуальною науковою проблемою, яка зараз має велике значення для залізничного транспорту України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у відповідності до Концепції та програми реструктуризації на залізничному транспорті України на 1998–2008 р., Наказу Укрзалізниці №583– Ц від 29.10.2001 р., а також за планами наукових робіт за темами університету “АРМ для розрахунку режимних карт руху пасажирських поїздів на дільниці Київ – Жмеринка”, номер держреєстрації № 0198U005786, “Інтелектуальні задачі та алгоритми для управління приладами електроспоживання електрифікованих залізниць”, № 0199U001432.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності процесу перевезень шляхом розвитку та застосування ресурсозберігаючих методів управління тягою поїздів з урахуванням умов неповної інформації, а також на основі методів удосконалення конструкцій рухомого складу при векторному показнику ефективності. У зв'язку з цим в роботі поставлені і вирішені наступні наукові задачі:

1. Дослідження структури, властивостей системи основних показників ресурсу і розробка комплексної багаторівневої моделі задачі розрахунку оптимальних режимів тяги поїзда, урахуваючи стохастичні та невизначені фактори процесів.
2. Розвиток методів розрахунку компромісно-оптимальних режимів тяги поїзда і при урахуванні стохастичних складових задачі.
3. Дослідження і рішення проблеми вибору оптимальних по вартості режимів тяги поїзда в умовах змінної на протязі доби ціни електричної енергії.
4. Розробка наукових положень і методів векторної оптимізації, орієнтованих на рішення комплексних задач по розрахунку оптимальних режимів тяги поїздів.
5. Удосконалення методів побудови адекватних математичних моделей по даним пасивних експериментів, призначених для ефективного розрахунку оптимальних режимів тяги поїздів і конструкцій рухомого складу.
6. Удосконалення математичних моделей, методів і реалізація нових векторних задач параметричної оптимізації конструкцій рухомого складу, які забезпечують підвищення критичних швидкостей стійкого руху, екологічну безпеку експлуатації вагонів-цистерн, ефективно і безпечно перевезення вантажів, труб.
7. Удосконалення методів розрахунку і дослідження компромісно-оптимальних параметрів для задач оптимального проектування пружних стержневих систем і оболонкових конструкцій, які функціонують в умовах варіантних навантажень.

Об'єктом дослідження є процеси і технології управління режимами тяги поїздів та удосконалення конструкцій рухомого складу при урахуванні комплексу показників ресурсів систем.

Предмет дослідження – ефективні за показниками витрат основних ресурсів режими тяги поїзда з урахуванням умов неповної інформації і компромісно-оптимальні параметри елементів конструкцій рухомого складу, що забезпечують ресурсозбереження.

Методи дослідження. Результати дисертації отримано за допомогою методів системного аналізу і векторної оптимізації, які використано для представлення і дослідження комплексних задач ресурсозбереження при управлінні тягою поїздів і проектуванні конструкцій рухомого складу; методами оптимального керування, дискретного і безперервного динамічного програмування розв'язано задачі по розрахунку режимів тяги поїздів;

сучасними методами будівельної механіки досліджено напружено-деформований стан конструкцій рухомого складу і їх елементів;

методами теорії стійкості досліджено критичні швидкості стійкого руху;

методами нелінійного програмування, екстраполяції, випадкового пошуку розв'язано задачі оптимального проектування конструкцій рухомого складу;

методи теорії імовірностей, математичної статистики, самоорганізації моделей, структурного математичного моделювання і регресійного аналізу використано при формуванні і дослідженні моделей складних процесів і об'єктів;

методами аналізу експериментальних даних досліджено результати натурних випробувань і кінцево-елементного моделювання по визначенню напружено деформованого стану елементів піввагонів, перемінну напругу в тяговій мережі і ціну електричної енергії в умовах функціонування оптового ринку;

методи теорії нечітких множин і експертних систем застосовані для прогнозування параметрів поїздопотоків при розрахунках режимів тяги з урахуванням перемінності напруги на струмоприймачі електровоза.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Уперше створено наукові основи для рішення багаторівневих задач оптимального управління тягою поїзда і задач оптимального проектування конструкцій рухомого складу, які містять вектор показників ресурсів і більш повно ураховують стохастичні властивості досліджуваних об'єктів.

2. Уперше отримано рішення комплексної проблеми розрахунку режимних карт, оптимальних за показником вартості електроенергії при перемінних на протязі доби тарифах, а також компромісно-оптимальних режимів тяги поїздів, що відрізняється розробкою стохастичної моделі ціни

електроенергії, методами розрахунку режимів тяги поїзда при одночасному виборі оптимальних варіантів переведення груп тягових підстанцій на умови диференційованих тарифів, статистичними критеріями оцінки вигідності застосування перемінних тарифів.

3. Уперше теоретично встановлена можливість розбіжностей між рішеннями стохастичної задачі оптимального управління режимами тяги поїзда і рішеннями її детермінованого еквівалента, в якому напруга в тяговій мережі дорівнює математичному очікуванню, і розроблено двохетапний метод розрахунку режимів тяги, які є стійкими до випадковості напруги на струмоприймачі електровоза.

4. Отримано удосконалену модель оптимального лінійного регулятора рухом пасажирського поїзда, яка відрізняється урахуванням температури тягового двигуна і зміни подовжнього профілю електрифікованої ділянки.

5. Удосконалено метод розрахунку режимів тяги поїзда, який відрізняється застосуванням неперервного динамічного програмування і на порядок меншим часом розв'язання стохастичної задачі управління рухом пасажирського поїзда на електрифікованій ділянці.

6. Одержано розвиток методів векторної оптимізації, які відрізняються удосконаленими властивостями ефективних рішень, аксіоматичним принципом компромісу показників ресурсів, узагальненням принципу мінімаксу і методу аналізу ієрархій, пристосованими для вирішення комплексних багаторівневих задач удосконалення конструкцій рухомого складу і режимів тяги поїздів.

7. Одержано розвиток методу щодо забезпеченню стійкого руху залізничного екіпажу за рахунок максимізації критичних швидкостей, що відрізняється розробкою і застосуванням методів лінійної та нелінійної екстраполяції при оптимізації параметрів конструкцій підвішування електровоза.

8. Удосконалено методи оптимального проектування конструкцій рухомого складу при кінцево-елементній дискретизації задачі, що відрізняються застосуванням процедур самоорганізації для апроксимації функцій обмежень при проектуванні тришарової металеві пластини з металевим стільниковим заповнювачем як захисту днища вагона-цистерни від дії наднормативних подовжніх ударів автозчеплювачем.

9. Одержано подальший розвиток методів параметричної оптимізації стержневих і оболонкових конструкцій, що знаходяться в умовах комбінованого, багатоваріантного навантаження, дії агресивного середовища, які відрізняються урахуванням вектору показників ресурсів і застосуванням спеціалізованих методів лінійної і нелінійної апроксимації при вирішенні нових задач оптимального проектування.

10. Розвинуто методи формування моделей задач оптимізації за даними пасивних експериментів, що мають відмінність у поєднанні методів самоорганізації та структурного математичного моделювання для удосконалення регресійного аналізу, у детермінації напрямку стохастичних залежностей між змінними, у модифікації моделей потокових графів для обробки даних, представлених нечіткими величинами, а також у застосуванні методів експертних систем для оперативного прогнозування параметрів поїздопотоків при розрахунку режимів тяги поїздів.

Практичне значення отриманих результатів. Значення роботи полягає у створенні методів розрахунку режимних карт тяги поїздів, оптимальних за показником вартості електричної енергії, а також у розробках рекомендацій щодо зменшення вартості електроенергії, спожитої на тягу поїздів в умовах перемінних тарифів платежів; запропоновані методики оптимального проектування з урахуванням вектору показників ресурсів дозволяють визначити значення раціональних параметрів конструкцій підвішування електровоза, конструкцій захисту днища вагонів-цистерн, нормувати навантаження і кріплення труб в піввагонах. При цьому отримано наступне.

1. Методи управління тягою поїздів при перемінних тарифах на електроенергію увійшли до рекомендацій країн Організації співробітництва залізниць по забезпеченню енергооптимального процесу перевезень на основі інформаційних технологій керування системами електричної тяги (м. Сенограби, Чеська Республіка, 2003 р.).

2. Методика переведення тягових підстанцій на диференційований тариф з метою зменшення сумарної вартості електроенергії, спожитої на тягу поїздів, в 2001 році запроваджена в Го-

ловному управлінні “Електрифікація та електропостачання” Укрзалізниці з економічним ефектом, що складає 200 тис. грн. на рік.

3. Методика оптимального проектування конструкцій захисту цистерн від наднормативних подовжніх ударів запроваджена в інституті Технічної Механіки НАНУ і Аерокосмічного агентства України і використана при розрахунках параметрів тришарових конструкцій захисту з металевим стільниковим заповнювачем.

4. Рекомендації зі схем завантаження труб в піввагони використані у місцевих технічних умовах, запроваджених на Нижньодніпровському трубопрокатному заводі з 1997 року, і забезпечують раціональне завантаження піввагонів трубами усіх сортamentів при забезпеченні збереження рухомого складу.

5. Методи прогнозування параметрів поїздопотоків та вагонопотоків на основі моделі нечітких поточкових графів, а також методи автоматичного формування баз знань експертних систем застосовані в програмній системі “Автоматизоване робоче місце працівника служби перевезень для управління економічним використанням іновагонів на полігоні Укрзалізниці”, запровадженій у дослідну експлуатацію в Головному управлінні служби перевезень Укрзалізниці у 2001 році

6. Результати досліджень і розробок використані в учбових курсах: “Основи САПР машин”, “Будівельна механіка”, “Розробка експертних систем”, “Машинні методи моделювання складних систем управління”.

Розроблені в дисертації методи оптимального проектування конструкцій рухомого складу та розрахунку режимів тяги при урахуванні вектору показників ресурсів, розрахунково-експериментальні екстраполяційні методи проектування та методи математичного моделювання за даними спостережень дозволяють більш повно та адекватно відображати складні процеси та явища. Вони можуть ефективно застосовуватися для удосконалення управління тягою поїздів, а також для широкого кола векторних задач оптимального проектування конструкцій рухомого складу.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, розробки і результати досліджень, що виносяться на захист, отримані особисто автором. У наукових працях, опублікованих зі співавторами, особистий внесок здобувача визначається наступним. У [1] автором написано розділи 1.5.6 – 1.5.8, 1.6 – 1.9, 3.1.2 – 3.1.5, 3.2. У [2] автору належить глава 2, розд.3.10. У [3] сформульована і досліджена стохастична векторна задача оптимізації режимів тяги поїзда; в [4] виконано аналіз компонентів системи поїзд-електротягова мережа, удосконалено моделі супутнього поїздопотоків; у [5] запропоновано багаторівневу модель задачі ЗРВП, обґрунтовано вартісний критерій щодо режимів ведення поїздів; у [6] побудовано модель оптимального регулятора для управління рухом пасажирського поїзда; у [10] доведено загальну теорему і умови ефективності рішень векторної задачі; в [11] вперше для окремих видів задач векторної оптимізації конструкцій запропоновано аксіоматичне компромісне рішення; у [17] розроблено моделі і метод оптимального проектування тришарових металевих пластин із стільниковим металевим заповнювачем як захисту залізничних вагонів-цистерн від наднормативних подовжніх ударів; у [18] запропоновано екстраполяційні методи і виконано оптимізацію системи підвішування електровоза ДСЗ; у роботі [19] сформульовано аксіоматичний метод векторної оптимізації і розв’язано задачу компромісно-оптимального проектування оболонкової конструкції з перемінною товщиною за показниками ваги, надійності, довговічності; у [20] запропоновано метод побудови оптимальної m -мірної багатогранної апроксимації границь стійкості для пружних стержневих систем; у [21] побудовано модель, метод оптимального проектування і досліджено компромісно-оптимальні проекти пружних усічених підкріплених конічних оболонок; у роботі [22] встановлено властивості взаємної суперечливості для системи показників оптимальності стержнів, що працюють в умовах корозії; в [23] досліджено властивості двох моделей компромісу вектору показників; в [24] розвинуто метод аналізу ієрархічних систем показників векторних задач оптимізації; у [26] досліджено напружено-деформований стан піввагонів і розроблено раціональні схеми завантаження вагонів трубами; у роботі [28] за допомогою методів самоорганізації побудовано моделі для прогнозування динамічних характеристик залізничних екіпажів; у роботі [32] запропоновано і досліджено методи детермінації направленості стохастичних залежностей перемінних; у [33] розроблено метод розрахунку характеристик поточкових графів, представлених нечіткими величинами ; в [34] розроблено систему моделей і методів для

вибору варіантів переведення тягових підстанцій на диференційовані тарифи в рамках задачі розрахунків режимних карт ведення поїзда; в роботі [35] вперше розроблено стохастичні критерії для оцінки вигідності перемінних тарифів і модель ціни електроенергії в ОПЕ.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації доповідались, обговорювались та були схвалені на: - IX, X Міжнародних конференціях “Проблеми механіки залізничного транспорту. Динаміка, надійність і безпека рухомого складу” (м. Дніпропетровськ, 1996, 2000); - 5th, 7th International Scientific Conference of Railway Experts. ЖУЖЕЛ–98, ЖУЖЕЛ–2000 (Yugoslavia, Vrnjaska Banja, october 28 – 30, 1998; october 4 – 6, 2000); - Міжнародному симпозиумі Eltrans’2001, 23- 26 жовтня 2001, (м. Санкт-Петербург, Росія); - I, II та III Міжнародних конференціях “Проблеми економіки транспорту” (м. Дніпропетровськ, 2001, 2002, 2003 р.); - міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології на транспорті. Стан і основні напрямки розвитку” (м. Київ, 14 – 17 травня 1998); - міжнародній науковій конференції “Автоматика – 2000”, (м. Львів, Україна); - міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми механіки гірничо-металургійного комплексу” (м. Дніпропетровськ, 28 – 31 травня, 2002); - Міжнародній конференції “Проблеми оптимізації в механіке деформованого тіла”, 1995 (м. Нижній Новгород, НГУ, Росія); - First International Conference on Evolutionary Computation and Its Applications. June 24 – 27, 1996. (Moscow, Russia); - міжнародних науково-методичних конференціях “Комп’ютерне моделювання” (м. Дніпродзержинськ, 1999 – 2002); - семінари “Проблеми керування та інформатики”, ДІТ (м. Дніпропетровськ, 1998 – 2002); - науковому семінарі кафедр будівельної механіки, ЕОМ і комп’ютерних інформаційних технологій ДІТу, (м. Дніпропетровськ, 2000, 2002, 2003).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 35 наукових працях, у тому числі у двох монографіях, у 13 статтях в наукових журналах, у 19 статтях в збірниках наукових праць, у одній статті в матеріалах міжнародної конференції.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків і 6 додатків. Основний текст – на 292 сторінках, 72 рисунки, 43 таблиці, список використаних джерел із 290 найменувань на 28 сторінках, додатки на 166 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність проблеми, сформульовані мета і задачі досліджень, розкрито наукова новизна результатів, їх практичне значення. Приводяться відомості про апробацію і публікацію результатів дисертації.

У **першому розділі** зроблено аналіз літератури з питань розвитку систем, технологій і методів щодо забезпечення ресурсозбереження на залізничному транспорті, встановлено сучасні напрямки розвитку методів ресурсозбереження при управлінні тягою поїздів, удосконалення та розвитку багаторівневих систем управління, напрямків та задач, які пов’язані з розробкою методів по удосконаленню конструкцій рухомого складу і забезпечують підвищення ефективності процесу перевезень. Розглянуто задачі управління тягою поїздів з урахуванням стохастичних характеристик досліджуваних процесів і перемінної ціни електроенергії, а також задачі удосконалення конструкцій рухомого складу по вектору показників ефективності систем. Розкрито напрямки: - дослідження можливостей ресурсозбереження за рахунок застосування системного підходу до задач розрахунку режимів ведення поїздів (ЗРВП) і проектування конструкцій рухомого складу, - основні шляхи, методи та засоби удосконалення та оптимізації режимів ведення поїздів за критеріями мінімуму електроспоживання на тягу і вартості спожитої електричної енергії при перемінних у часі тарифах, побудова компромісно-оптимальних режимів ведення поїздів.

Потреба у розвитку проблеми ресурсозбереження при оптимізації режимів тяги і удосконаленні конструкцій рухомого складу (РС) представлена на різних рівнях управління процесами перевезень і зв’язана з їхньою високою складністю, комплексністю і багатосторонністю. Відзначено значний внесок у рішення задач, присвячених рухомому складу залізниць що розглядаються, в роботах багатьох вчених: Айзінбуда К.С., Балона Л.В., Бірюкова І.В., Блохіна Є.П., Богомаза Г.І., Боднаря Б.Є., Босова А.А., Браташа В.О., Галієва І.І., Гетьмана Г.К., Голубенка О.Л., Дановича В.Д., Дьоміна Ю.В., Камаєва В.А., Кельріха М.Б., Коротенка М.Л., Костроміна А.М., Коссова В.С.,

Коссова Є.Є., Лазаряна В.А., Лисицина Л.В., Манашкіна Л.А., Марквардта К.Г., Мирошніченко Р.І., Нікіфорова Б.Д., Палея Д.А., Петрова Ю.П., Почасєвця Е.С., Плакса П.В., Пузанова Н.Я., Розенфельда В.Е., Савоськіна А.М., Тибілова Т.А., Тартаковського Е.Д., Ушкалова В.Ф., Щербакова В.Г., Хусідова В.Д., інших.

Проведений аналіз і виконані у розділі розрахунки показали актуальність і ефективність комплексних досліджень режимів ведення поїздів (з урахуванням стохастичних характеристик електрорухомого складу, електротягової мережі, графіків руху, планування вагонопотоків і поїздопотоків). Через складність ЗРВП представлена багаторівневою задачею стохастичного програмування з рівнями: -1) аналіз і формування поїздопотоків, - 2) електротягова мережа, - 3) режими тяги. Встановлено, що рішення цих задач на сучасному теоретичному, експериментальному й інформаційному рівні можливе на основі розвитку методів векторної оптимізації (ВО) і математичного моделювання процесів за даними пасивних експериментів. Розрахунки і дослідження виявили суттєві особливості режимних карт тяги (РК), оптимальних по вартості при перемінній ціні електроенергії (оптовий ринок – ОРЕ, диференційовані тарифи – ДТ), і показали необхідність спектра оптимальних РК.

Одним з важливих напрямків досліджень по удосконалюванню конструкцій РС є застосування і розвиток методів оптимального проектування (ОПК). Аналіз показав істотний резерв комплексного підходу і потребу в створенні наукових основ для рішення задач векторної оптимізації в галузі залізничного транспорту. Виділена основна властивість векторного показника ефективності, що визначає ресурси систем, представлена у формі *взаємної суперечливості* компонентів цілі. У виконаних дослідженнях векторних задач оптимізації параметрів РС використано евристичні методи згортки компонентів цілі (Камаєв В.А., Коротенко М.Л., Савоськін А.М.), а також запропоновано методи розв’язання обернених задач щодо розрахунку вагових коефіцієнтів (Камаєв В.А., Малков В.П.). Напрямок подальшого розвитку цих досліджень є урахування багаторівневості складних систем, застосування аксіоматичного вибору принципу компромісу і розрахунку вагових коефіцієнтів цілі з урахуванням властивості компонентів вектору ресурсів, що виконано в роботі.

Значна складність стохастичних багаторівневих моделей по розрахунку характеристик і оптимізації конструкцій РС робить перспективним розвиток екстраполяційних методів проектування (Растригін Л.А.), а також застосування імітаційних моделей досліджуваних систем (Івахненко А.Г.), побудованих за даними спостережень об’єктів, що зменшує витрати обчислювальних ресурсів і обсяги експериментальних досліджень. Сучасні інформаційні технології забезпечення процесу перевезення також можуть бути використані для розрахунку параметрів моделей задач оптимального керування рухом поїзда: характеристик поїздопотоків на ділянках, напруги на струмоприймачі при різних режимах роботи електротягових мереж.

На підставі аналізу сформульована мета та задачі дисертаційної роботи.

У розділі два отримано подальший розвиток стохастичної моделі задачі розрахунку оптимальних режимів ведення поїзда з урахуванням умов неповної інформації, коли ефективність рішення оцінюється одним або декількома показниками ресурсів (споживання і вартість електроенергії, час руху й ін.). Встановлено, що облік вартості електроенергії при перемінному тарифі оплати в різні періоди доби, істотно розширює зміст задачі ЗРВП і вимагає розробки удосконалених методів для її ефективної чисельної реалізації. В роботі задача ЗРВП включена у багаторівневу структуру цільових показників (обсяги перевезень, вектор ресурсів перевезення, $A(t)$ – показники витрат електроенергії; $C(A, t)$ – вартість електроенергії) і інших і полягає в розрахунку параметрів керування, що забезпечують ефективні значення вектора показників якості керування при виконанні системи вимог до заданих характеристик руху поїзда (з урахуванням профілю шляху, обмежень швидкості, заданого часу руху по ділянці, стохастичних властивостей напруги на струмоприймачі електровоза, температури електротягових двигунів). Задача для розрахунків РК тяги поїзда як гнучкої нитки довжини L_n з погонною масою $p_n(z)$, $0 \leq z \leq L_n$ описується удосконаленою системою диференціальних рівнянь, що мають при різницевій апроксимації по параметрі “ x ”, $X = \{x_k = kh_x, k = 0, 1, 2, \dots, n_x\}$, вид

$$v_{k+1}^2 = v_k^2 + h_x \frac{2\zeta}{(q+Q)(1+\gamma)} [F_e(x_{(k)e}) - W(x_{(k)w}) - B_T(x_{(k)B})]; \quad (\text{a})$$

(1)

$$\tau_{k+1} = \tau_k + h_x \frac{\tau_*(I_D(v(u(x_k, t), U_C(x_k, t, \theta))) - \tau(x_k, t))}{v(x_k, t)T_D(I_D(v(u(x_k, t), U_C(x_k, t, \theta))))}, \quad (\text{b})$$

при початкових умовах

$$x(0) = x_0; \quad v(0) = v_0; \quad \tau(0) = \tau_0. \quad (2)$$

У (1) – (2) позначено: x, t – координати місця і часу; $u(x, t)$ – керування (номер позиції контролера); v – швидкість центра мас; q, Q – маси локомотива і поїзда; γ – коефіцієнт інерції обертових мас; $\zeta = g/1000$, g – прискорення сили ваги; F_e – сила тяги локомотива; $W(*)$ – опір поступальному рухові поїзда; діюча на поїзд гальмова сила – B_T ; τ – температура нагрівання тягових електродвигунів; $\tau_* = \phi_\infty$, T_D, I_D – теплові характеристики і струм тягового електродвигуна; $x_e = (v, u, U_C)$; $x_w = (x, v, u)$; $x_B = (v, k'(t), u, U_C)$, $k'(t)$ – сумарна сила натискання гальмових колодок; θ – сукупність випадкових факторів.

У ЗРВП як векторній Р-задачі стохастичного оптимального керування, $\bar{F}(F_k)_n$ $\bar{F}(x, v, u, t, \theta) = (F_1(x, v, u, t, \theta), \dots, F_{10}(*))$, основні компоненти цілі мають вид

$$P\{Y(u) \geq Y_*\} \Rightarrow \max; \quad M[C(Y(u), A(u, \theta))] \Rightarrow \min, \quad M[A(u, \theta)] \Rightarrow \min, \quad (3)$$

де

$$A(*) = \sum_{x_0}^{x_s} \int \frac{(U_C(x, t) + I_a(x, v, u, t)\rho(x))I_a(*)dx}{v(x, u, t)}. \quad (4)$$

У (3) – (4) позначено: Y_* – заданий обсяг перевезень, $I_a(*)$ – активний струм електровоза, $v(x, t, u(*))$ – швидкість руху поїзда в місці x в момент t , $\rho(x)$ – еквівалентний опір тягової мережі, $P(*)$ – імовірність щодо обсягів Y_* , $M[*]$ – знак математичного очікування. Обмеженнями задачі ЗРВП є імовірності виконання вимог до припустимих фазових траєкторій $G_{XVT} = \{x_0 \leq x \leq x_s; \quad 0 < v \leq v^{\max}(x, t); \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}\}$, обмежень можливих керувань $u(x, t, U_C(*))$,

$P\{(u, v, \tau, t) \in G_{IFK}\} \geq P_3$, $U_C(*)$ напруга на струмоприймачі, обмеження щодо часу руху поїзда по ділянці T_*

$$P\{T_X(u) = \int_{x_0}^{x_s} \frac{dx}{v(x, u, t)} = T_*\} \geq P_4, \quad (5)$$

Для рішення ЗРВП (1) – (5) розроблені двохетапні моделі і детерміновані еквіваленти задачі стохастичного оптимального керування. Показано, що в ЗРВП, одержуваних при дискретизації рівнянь (1) – (2) і заміні напруги $U_C(*)$: $\bar{U}_C(x, t) = M[U_C(x, t, \theta)]$ в тягові мережі математичним очікуванням, як задачах нелінійного програмування виду

$$\min_{z \in G_Z} (\varphi_0(z, \bar{U}_C)), \quad G_Z = \{\varphi_i(z, \bar{U}_C) \leq 0, i = 1, 2, \dots, n_\varphi; z \in Z\}, \quad (6)$$

не виконуються нерівності Ієнсена: $M[f(\eta)] \leq f(M[\eta])$, η – дійсна випадкова величина, $f(\eta)$ – безперервна опукла нагору функція. Для (1) – (5) заміна детермінованим аналогом неприпустима, тому що рівняння (1) – (2) і характеристики моделі (3) – (5) не є лінійними безперервними й опук-

лими нагору функціями дійсного перемінного відносно $\bar{U}_C(*)$, як і F_e – сила тяги (1)-а), (1)-в) й інш., і тому може бути невідповідність рішень для стохастичної і детермінованої моделей задачі (рис. 1).

Для розрахунків оптимальних РК тяги поїзда, стійких до перемінності $U_C(x,t,\theta)$, сформульована і вирішена двохетапна задача ЗРВП, де “захищеність” означає мінімальні витрати електроенергії на основний режим тяги і на його корекцію в реальних умовах, в якій додатково вважаються відомими значення діапазонів відхилень напруги у тяговій мережі від розрахункового номіналу \bar{U}_C :

$$\Delta U_C(\theta) = ((P_1, \Delta U_1(\theta_1)), (P_2, \Delta U_2(\theta_2)), \dots, (P_k, \Delta U_k(\theta_k))) , \sum_j P_j = 1, \quad (7)$$

рис.1 Графіки оптимальних швидкостей руху електропоїздів на ділянці Київ – Фастів при випадковій величині напруг на струмоприймачі електровоза

де

$\{P_j \geq 0\}_k$ – оцінки імовірностей для діапазонів відхилень напруг $\{\Delta U_j(\theta_j)\}_k$. Мінімальні очікувані витрати на реалізацію керування $u(x,t,\theta)$ і його оптимальну корекцію утворюють критерій двоетапної задачі ЗРВП виду:

$$A(u(x,t)) + M[\Delta A(u(x,t,\theta))] \Rightarrow \min_{u \in D_u}, \quad (8)$$

коли

$\Delta A(x,u,t,\theta) = \rho(x) | I_{ak}^2(u(x,t,\theta)) - I_a^2(u(x,t)) |$, $A(*)$ – відповідає (4), $I_{ak}(x,u,t,\theta)$ – струм що компенсує $I_a(*)$, коригувальна множина збігається з множиною керувань. Перехід до двохетапної моделі ЗРВП (7) – (8) дозволив одержати РК, що при незначному збільшенні витрати електроенергії є досить стійкими до варіацій напруги $U_C(x,t,\theta)$, і тому більш прийнятні для практики.

На основі аналізу властивостей реалізованих режимів руху поїздів на ділянці удосконалений метод розрахунку керувань за рахунок синтезу оптимальних регуляторів, коли режими тяги розраховуються не ізольовано, а у взаємозв'язку з відомими програмами руху, що складають *базу знань*. Для розрахунку режимів тяги, зв'язаних з програмою оптимального керування $u^0(V,s,t)$ (V – швидкість, s – шлях, t – час, $u(*)$ – струм, позиція контролера), використана методика, розроблена Ю.П. Петровим. Для одержання лінійаризованих рівнянь системи (1) – (2) у безперервному представленні уведений вектор $x(s) = (x_1(s), x_2(s))$ відхилень ($x_1(s)$ – по швидкості, а $x_2(s)$ – по температурах електродвигунів), що вважаються малими; $y(s)$ – додатковий керуючий вплив. Рівняння руху керованої системи представлені у виді

$$\frac{dx_1}{ds} = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + b_1y(s) + \varphi_1(s); \quad \frac{dx_2}{ds} = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + b_2y(s) + \varphi_2(s). \quad (9)$$

де

$\varphi_1(s), \varphi_2(s)$ – випадкові функції, що характеризують розбіжності значень сил у задачі й при побудові $u^0(V,s,t)$ і зв'язуються із силами $w_1(s)$, обумовленими зміною подовжнього профілю. Позначимо $D = \frac{d}{ds}$, $A(D) = A_2D^2 + A_1D + A_0$, що відповідають операторному рівнянню (9); поліном $G(D)$ і $G(-D)$ – сполучений до $G(D)$, визначені у системі необхідних умов екстремума у формі рівнянь Ейлера – Пуасона. Тоді модель оптимального стійкого регулятора для випадкових впливів типу кореляційної функції $K_\psi(\tau_s) = \exp(-\alpha\tau_s)$ має вид

$$y(s) = [A(D) - G(D)G(\alpha) / A(\alpha)]x(s). \quad (10)$$

Модель (10) лінійна і забезпечує мінімум функціонала якості для усіх впливів, що збурюють рух замкнутої регулятором системи, і він є стійким. Отримані рівняння змін керуючого впливу, середні квадрати координат $\langle x^2(s) \rangle$ і керувань $\langle y^2(s) \rangle$.

У розділі удосконалено методи рішення ЗРВП (1) – (5) шляхом переходу до неперервного динамічного програмування (НДП). Застосовано квадратичні апроксимації сил опору, сил тяги від швидкостей $v(x)$, фазового простору, побудованого на *нерівномірній* сітці станів, в якому вузли по осі OX (шлях) вибрані так $\Delta S_i = (x_{i+1} - x_i)$ ($i = 0, 1, \dots, N; x_N = x_S$), щоб сили $w_i = w(x_i, x_{i+1})$ для ділянки були постійними, при формуванні квадратичних поліномів, що апроксимують витрати електроенергії на рух поїзда на ділянці ΔS_i . Метод рішення задачі складається з наступних етапів.

1. *Розрахункова* побудова фазового простору станів задачі ЗРВП із нерівномірною сіткою по параметрах шляху і швидкості $v(x)$ на основі вибору керування в зоні максимальних значень к.к.д. двигуна. Аналітичне інтегрування системи рівнянь (1), (2), з огляду на зазначені апроксимації їхніх компонентів.

2. Апроксимація “клітин” фазового простору квадратичними поліномами, що представляють витрати (електро)енергії на перехід з x_i у x_{i+1} при русі поїзда в межах клітини. Завдання початкових η і кінцевих d_v значень параметрів “трубки” області можливих швидкостей, що дають точність рішення по $v(x)$: $\delta_v(v^{(k)}(x)) \leq d_v$.

3. Перехід від набору “клітин” ділянки $\Delta S_i(x_i, x_{i+1})$ до оцінки математичного очікування витрат енергії на перехід з T_* в x_{i+1} : формування єдиної енергетичної моделі руху по ділянці при узагальненні моделей апроксимацій кліток, що попадають у діапазон δ_v щодо рішень поточного етапу k . Лінійна апроксимація (5) – заміна “середньошляховою” швидкістю. Побудова методом множників Лагранжа рекурентних рівнянь умов оптимальності НДП з урахуванням обмежень часу руху по ділянці T_* .

4. Рішення рекурентних рівнянь, вибір оптимальних режимів керування двигуном і розрахунок значень дільничних швидкостей руху, що відповідають моделі етапу 3.

5. Звуження області δ_v апроксимації ділянок, перехід до етапу 3, або ж результати етапу 4 є шукане рішення задачі ЗРВП.

Керування тягою електровоза виконувалося по електромеханічних характеристиках двигуна в зоні максимальних значень к.к.д. для різних швидкостей руху, апроксимуючи по тягових характеристиках обрані керуючі позиції. Подібним чином будуються і апроксимації для гальмових сил.

При функції стану в $X_N = x_S$ рівній $F_N(V_N) = r_N V_N^2 + p_N V_N + q_N$, ураховуючи (5) множником λ , одержують умови оптимальності НДП у наступному виді рівнянь

$$\frac{\partial F_{N-1}}{\partial y} = \lambda \gamma_N + 2\tilde{b}_N x + 2\tilde{c}_N y + \tilde{\beta}_N + 2r_N y + p_N = 0, \quad y = l_N x + m_N(\lambda); \quad l_N = -\frac{b_N}{c_N + r_N}; \quad (11)$$

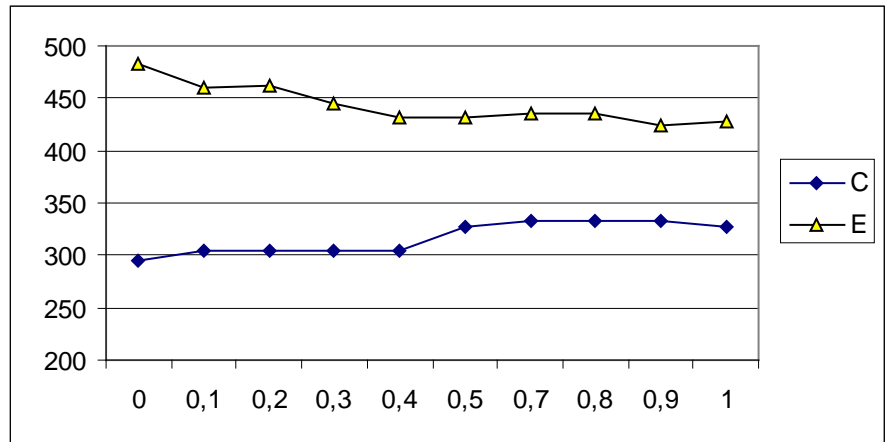
і будують рекурентні співвідношення для y (відповідає V_{i+1}) по x (відповідає V_i). Послідовно виконуючи рекурентні підстановки, знаходять $F_1(V_1)$ і оптимальну швидкість V_1^* , через яку розраховують швидкості на інших ділянках $\Delta S_i(x_i, x_{i+1})$ у виді

$$V_{i+1}^* = m_i V_i^* + l_i; \quad V_{i+1}^* = V_1^* \prod_{j=1}^i m_j + \sum_{k=1}^i l_k \prod_{l=k-1}^i m_l, \quad i = 1, \dots, N-1. \quad (12)$$

Рис. 2. Графіки ефективних швидкостей руху пасажирського поїзда на ділянці Київ Пасажирський – Фастів 1

Таблиця 1

Енергія	Вартість	k
482	295,2	0
460	303,7	0,1
462	303,7	0,2
444	303,7	0,3
432	303,7	0,4
432	327,8	0,5
435	332,4	0,7
435	332,4	0,8
424	332,4	0,9
428	328	1



Час розрахунків за НДП оптимальних режимів тяги і швидкостей руху пасажирського поїзда на ділянці Київ – Миронівка, коли враховувався стохастичний характер $U_C(x, t, \theta)$, скоротився на порядок у порівнянні з методом дискретного ДП.

У розділі розроблено метод для розрахунків компромісно-оптимальних режимів ведення поїзда, реалізований на базі НДП, коли векторна задача урахувала F_A^* , F_C^* – показники витрати і вартості електроенергії задачі ЗРВП (3). В зоні з меншою ціною електроенергії стає вигідною більш висока швидкість, що компенсує уповільнений рух у зоні з більш високою ціною. Ефективні режими тяги розраховують за допомогою методу варіації коефіцієнта α , а також методом обмежень виду

$$F_A^* \Rightarrow \min_{u \in D_U}, t^{(1)} \leq t_{1(\alpha)}^{(1)}, t_{1(\alpha)}^{(1)} \in [t_{1(c)}^{(1)}, t_{1(A)}^{(1)}]. \quad (13)$$

з урахуванням умови (5), якщо для цін електроенергії по ДТ $c(t_1), c(t_2)$ виконані відносини: $c(t_2) < c(t_1)$, $t_2 > t_1$. У задачах (13) через $\{t_{1(c)}^{(1)}, t_{1(A)}^{(1)}\}$ позначені часи руху $t^{(1)}$ в тарифній зоні з ціною енергії $c(t_1)$, розраховані за (13) при $\alpha = 0$ і $\alpha = 1$, відповідно. При зворотному співвідношенні $c(t_1), c(t_2)$ знаки відносин у (13) протилежні. На рис. 2 показані графіки оптимальних швидкостей руху поїзда, локомотив ЧС-4 і 12 пасажирських вагонів, при проходженні границі (вертикальна пряма) двох часових зон, що мають різні тарифи (півпиковий, нічний). Коефіцієнт k установлює компроміс показників вартості (крива E праворуч від таблиці відповідає $k = 0$) і витрати електроенергії (крива E при $k = 1$), коли вартість електроенергії не враховується. Табл. 1 і відповідний графік відбивають компромісний характер показників задачі (13), де при застосуванні ДТ зменшення вартості електроенергії на 11,6% досягнуто при збільшенні електроспоживання на 11,1%.

У розділі три отримано подальший розвиток і удосконалення методів векторної оптимізації, орієнтованих на рішення досліджуваних комплексних задач з показниками ресурсів систем. Удосконалені методи розрахунку множин компромісно-оптимальних рішень із застосуванням рівномірних числових $ЛП\tau$ -послідовностей при параметризації областей компромісу, при використанні умов узгодженості компонентів цілі, з урахуванням невизначеності переваги компонентів цілі, а також на основі оптимальної апроксимації компромісних множин. Для векторних задач виду

$$F(x) \rightarrow \min_{x \in D_x}, F(x) = \{f_1(x), \dots, f_N(x)\}; D_x = \{x: g_k(x) = 0, g_l(x) \leq 0, x^- \leq x \leq x^+\}, \quad (14)$$

де

$x = (x_1, \dots, x_n)$ параметри проектування, запропонований метод побудови границі G_F області Парето P_F , який поєднує числові ЛП_τ послідовності (Соболь І.М.) з методом Das-параметризації (Das I.), коли границя G_F формується шляхом рішення множини задач оптимізації, які визначають нормальний перетин P_F пучком “рівномірно” розподілених у просторі паралельних прямих. Особливість методу полягає у використанні ЛП_τ послідовності і лінійній апроксимації P_F при утворенні пучка.

На основі відношення Парето розвиті методи формування області P_F :

1. Сформульовано конструктивне визначення компромісно-оптимальних рішень задач ВО, засноване на *узгодженні* значень вектора цільових функцій. Вивчено властивості, розроблений алгоритм побудови таких рішень.

2. Виконано модифікацію відношення Парето і розроблено метод розрахунку, що дозволяє задавати діапазони невизначеності для значень часткових показників $f_j(x)$, і відрізняється також урахуванням *відстаней* між порівнюваними проектами *в просторі параметрів* x , забезпечуючи можливість побудови рівномірної апроксимації множини Парето \tilde{P}_F . Розроблено різноманітні форми інтервалів невизначеності переваг, що залежать від можливостей одержання додаткової інформації.

Розроблено метод ВО, що полягає у аксіоматичному визначенні принципу компромісу з властивостями симетрії і ефективності для єдиного рішення, що включає методіку розрахунку вагових коефіцієнтів часткових показників по даним про аналоги систем. Сформульовано визначення і доведені властивості *нового* класу векторних задач оптимального проектування, для яких застосування принципу вибору

$$\lambda^0 = \max_{x \in D} \min_{k \in N} \left\{ \lambda_k^1 = \frac{\lambda_k}{\alpha_k} = \frac{1}{\alpha_k} \frac{f_k(x) - f_k^-(x)}{f_k^+ - f_k^-} \right\} \quad (15)$$

гарантує одержання єдиного компромісного рішення x_c^0 , що задовольняє аксіомам *оптимальності по Парето* $x_c^0 \in P_x$ і *симетрії*

$$\lambda_p(x_c^0) \alpha_p^{-1} = \lambda_q(x_c^0) \alpha_q^{-1}, \quad \forall p, q \in N, \quad (16)$$

де f_k^-, f_k^+ - мінімальні і максимальні оцінки в $x \in D_x$. За інформацією про аналоги об'єктів проектування разом з (16) отримані рішення зворотної задачі по обчисленню оцінок коефіцієнтів важливостей $\{\alpha_k\}_N$ при $\lambda_k^0 = (Y_k^0 - f_k^-) / (f_k^+ - f_k^-)$ у виді

$$\tilde{\beta}_k = \prod_{j=1}^N \lambda_j^0 / \lambda_k^0; \quad \beta_k = \tilde{\beta}_k / \sum_{j=1}^N \tilde{\beta}_j; \quad \alpha_k = \beta_k^{-1}; \quad \text{при } (l > 1) \quad \tilde{\beta}_k = \left(\prod_{j=1}^N \prod_{r=1}^l \lambda_j^{0(r)} \right) / \prod_{r=1}^l \lambda_k^{0(r)}; \quad k = \overline{1, N}.$$

У роботі подано формальні і змістовні приклади класів задач ОПК конструкцій і вибору режимів тяги із властивостями взаємної суперечливості $\{f_k(x)\}_N$ (15) – (16).

У розділі удосконалено метод аналізу ієрархії (Сааті Т.) показників цілі, отримано узагальнення принципу мінімакса для багаторівневих задач векторної оптимізації, що не потребує строгої ієрархії, може застосовуватися при залежності переваги показників від альтернатив і неопуклих моделях задач векторної оптимізації. Рекурентний спосіб узагальнення часткових показників і ко-

ефіцієнтів важливості $\alpha = \{\alpha_{(r)}\}$ для мінімакса з урахуванням ієрархії критеріїв визначають рівняння виду

$$\varphi(f, \alpha) = \{f_i(x) | \alpha_i f_i(x) \geq \alpha_k f_k(x), \forall k \in m\}, \quad (17)$$

$$\varphi^{(r)}(f^{(r)}, \alpha^{(r)}) = \varphi(\varphi^{(r+1)}(f^{(r+1)}, \alpha^{(r+1)}), \alpha^{(r)}), r = L-1, \dots, 0. \quad (18)$$

Задача оптимізації для ієрархії показників цілі представлена в наступному виді

$$H^* = H[K(X^*)] = \min_{x \in D_x} \varphi^{(0)}(f^{(0)}, \alpha^{(0)}), \quad (19)$$

де для значень $\alpha^{(r)}$ виконується: $\alpha_{(0)} = (1)$, $f_{(0)} = f_0$, а 'r' – номер рівня показників.

У розділі чотири отримано подальший розвиток методів оптимального проектування для комплексних задач по удосконалюванню конструкцій рухомого складу. Задача по забезпеченню стійкого руху електровоза ДСЗ методами параметричної оптимізації конструкції підвищування представлена у формі максимізації критичних щодо стійкості швидкостей, для рішення якої розроблено методи лінійної та нелінійної екстраполяції у просторі параметрів керування і програми випадкового пошуку. Розрахункова схема враховувала головні особливості конструкції (двохосьові безшкворневі візки з передачею сил тяги і гальмування до кузова за допомогою нахилених тяг; використання в системі буксового підвищування гідравлічних гасителів коливань, тощо). Секція ДСЗ рис. 3 розглядалася як механічна система, що складається з 15 абсолютно твердих тіл (кузова, двох рам візків, чотирьох проміжних балок, тягових електродвигунів і колісних пар) і 8 приведених до місць контакту коліс з рейками мас колії, що можуть переміщатися у вертикальному і горизонтальному поперечному напрямках. Переміщення і кути повороту тіл, що утворюють систему, приймалися малими. Диференціальні рівняння просторових коливань механічної системи, що представляє електровоз, виражені через набір керованих параметрів, отримані з використанням рівнянь Лагранжа II роду. Стійкість незбуреного руху оцінювалася за значеннями критичних швидкостей по першому наближенню Ляпунова.

Оптимальне проектування конструкції підвищування для підвищення критичної швидкості представлено як задачу недиференційованого нелінійного програмування з алгоритмічними обмеженнями виду

$$V_*(X_*) = \max_{\substack{X \in D_X \\ v(X) \in D_v}} \{V(X)\}, \quad (20)$$

$$D_v = \{X : \max(\text{Real}(v_j)) \leq 0\}, D_X = \{X : x_{k1} \leq x_k \leq x_{k2}; k = 1, \dots, n\}, \quad (21)$$

де

X – вектор керованих параметрів $\{x_k, k = 1, 2, \dots, n\}$, V_C – критичні швидкості; D_X – припустимі значення X , $v(0) = v_0$;

На основі аналізу чутливості основних параметрів конструкції електровоза, а також з урахуванням даних по електровозі ДЕ1, було обрано 9 (див. табл. 2). Деякі результати розрахунків оптимальних параметрів приведені в табл. 2, де зазначені: $2a_0$ – відстань у подовжньому напрямку між місцями кріплення до кузова люлечних підвісок візка, K_{ky} (кН/м) – жорсткість люлечного підвищування, β_{ky} (кНс/м) – коефіцієнт в'язкого тертя гідродемпферів другої ступені, жорсткості буксових ресорних комплектів і повідців у напрямках координатних осей (кН/м) – $K_{\sigma z}$, $K_{\sigma y}$, $K_{\sigma x}$, база візка $l_T = 1,35$ м, I_z – моменти інерції кузова (808.3), m_T – маса підресореної частини візка 22.6

т., $I_{кз}$ – моменти інерції необресорених частин візка 4.04. Табл. 2 показує значні додаткові можливості збільшення критичної швидкості від 160 км/год за рахунок параметричної оптимізації системи підвішування.

Удосконалено методи проектування на основі багатомірної лінійної (БЛЕ) і нелінійної екстраполяції, які застосовані для задачі (20) – (21) щодо електровоза ДСЗ, коли проектування зведено до розрахунку вектору параметрів конструкції для нових

Рис. 3. Розрахункова схема в задачі забезпечення стійкості руху електровоза ДСЗ.

умов за даними прототипів для деяких аналогічних ситуацій без процедур оптимізації. Позначимо множини даних для функції проектування $E_{XY} = \{ Y_*(X) = F(X), X_i \rightarrow Y_{*i}, i = 1, \dots, k \}$. Необхідно одержати $Y_* = F(X)$ у випадку, коли k ($k < n+1$) недостатньо для побудови лінійної моделі. БЛЕ складають етапи: $\{X\} \rightarrow \{X'\} \rightsquigarrow \{Y'\} \rightsquigarrow \{Y\}$, коли будується лінійна модель на підпросторах $\{X'\}$ і $\{Y'\}$, утворених E_{XY} , вводиться функція близькості ситуацій $\{X, X'\}$, $R(X, X') = \|X - X'\|^2$, припущення про перетворення $\{X'\} \rightsquigarrow \{Y'\}$ (лінійне) і $I_{\alpha}^2(u(x,t,0)) - I_0^2(u(x,t))$ (тотожне, експертне). Використано перетворення, що складається зі зміщення і повороту $\{X'_{pq}\}$, для гіперплощин у просторі умов і рішень виду

$$\{X'\} = p(qX_1 + \sum_{j=1}^{k-1} \lambda_j (X_{j+1} - qX_1)), \quad \{Y'\} = p(qY_1 + \sum_{j=1}^{k-1} \mu_j (Y_{j+1} - qY_1)) \quad (22)$$

де

$\lambda_j = \mu_j, j = 1, \dots, (k-1)$, а значення $\{\lambda_j, p, q\}$ знаходять із задач оптимізації і обчислюють значення Y_{*E} (22) по процедурі БЛЕ. У роботі удосконалено процедури екстраполяції за рахунок аналізу спрямованості стохастичних зв'язків $X \rightarrow Y$ для виділення найбільш істотних факторів $X_c \subseteq X$, переходу до багатомірної нелінійної екстраполяції $Y_*(X) = F_{HE}(X)$ (МНЕ), коли функції $F_{HE}(X)$ формуються методами самоорганізації, а також використання методів обробки нечітких величин і експертних систем для розрахунків раціональних значень проектних параметрів.

Проекти 2е, 10е табл. 2 розраховані за БЛЕ, коли розшукувалися варіанти, що істотно відрізнялися від прототипів 1, 2, 3. Для 2е відносна погрішність щодо критичної швидкості – 0,6%, для інших параметрів – 1% ; для 10е – погрішності до 6%.

На базі векторної оптимізації й імітаційного моделювання складних систем удосконалено методи оптимального проектування конструкцій РС при кінцево-елементній дискретизації задачі по розрахунку напружено-деформованого стану елементів, в яких шляхом самоорганізації (розділ 5) виконується апроксимація функцій обмежень. Отримано нові проекти конструкції захисту (мінімальної маси, вартості, максимальної міцності) днища вагона-цистерни від дії наднормативних подовжніх ударів автозчеплювачем у вигляді тришарової металеві пластини з металевим стільниковим заповнювачем.

Таблиця 2

Оптимальні параметри електровоза ДСЗ за критерієм максимуму критичної швидкості стійкого руху

№	V(км/год)	K_{ky}	$K_{\sigma z}$	$K_{\sigma y}$	$K_{\sigma x}$	β_{ky}	a_0
1	160	155	1960	5000	70000	35,8	0,6
2	176	155	1960	4200	50000	35,8	0,6
2е	175	153,4	1939,2	4207,6	50000	35,42	0,5936
3	183	155	1960	4000	43000	35,8	0,6
4	193	200	1800	3210	74640	35,0	0,635
5	198	182	1570	3955	29000	30,0	0,6

6	201,8	176	1421	3450	29000	34,2	0,514
7	204	174,7	1474	3450	29000	31,4	0,564
8	204	185	1460	3300	28000	34,3	0,6
9	208	192	1453	3200	27000	35,1	0,6
10е	224	186,8	1425,5	3201,2	25000	35,58	0,529

Рис. 4. Захисний пристрій днища вагонів-цистерн.

Напружено-деформований стан вагонів-цистерн із пристроями захисту днищ при подовжніх ударах досліджено з використанням квазистатичного підходу на основі методу кінцевих елементів (МКЕ) у виді методу переміщень. Кінцево-елемент-на модель вагона-цистерни, рис. 4, побудована з урахуванням особливостей деформування реальної конструкції при розглянутих навантаженнях, її геометричної конфігурації і фізичних властивостей матеріалу. Передбачалося, що конструкція цистерни, не враховуючи захисних пристроїв, працює в межах пружних деформацій. З зовнішніх впливів були враховані: власна вага конструкції цистерни і рідкого вантажу, ударне навантаження, інерційні сили і гідродинамічний тиск. За рахунок моделі-замісника для обмеження міцності задача проектування представлена у виді

$$Q(x) = t_1 \rho_1 + t_2 \rho_2 + t_3 * (k_{np} (a_c / b_c; \beta) \frac{\delta_c}{a_c}) \rho_3 \Rightarrow \min_{x \in D_x}, \quad (23)$$

$$F(\tilde{D}) \geq P_v, \quad \tilde{D} = E_0 t^3 \eta_3 / (12 * (1 - \mu_0^2)), \quad (24)$$

$$\sigma_y = (((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2) / 2)^{1/2} \leq k_T [\sigma_T]; \quad (25)$$

$$\sigma_z^{np} (a_c / b_c; k_{np}; E_3; [\sigma_3]) \leq [\sigma_3]; \quad \sigma_1 \leq [\sigma_1]; \quad \sigma_2 \leq [\sigma_2]; \quad (26)$$

$$E_z (\delta_c / a_c; k_{np}; E_3) = k_{np} \frac{\delta_c}{a_c} E_3 \geq E^*; \quad (27)$$

$$t = \sum_{j=1}^3 t_j \leq h_c; \quad x_i^- \leq x_i \leq x_i^+, i = 1, \dots, 7; \quad (28)$$

де

$Q(x)$ – вага (матеріалоемність) 1 м²; $P(x)$ – граничне навантаження; σ_z^{np} – приведені напруги міцності стільникового заповнювача; показники міцності елементів обичайки і днища цистерни за критерієм Хубера – Мізеса – Генкі: σ_e – еквівалентні напруги формоутворення, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруги, $[\sigma_T]$ – границя текучості, $0,5 \leq k_T < 1$; вектор керованих параметрів x : – товщини зовнішніх шарів (t_1, t_2), – товщина стільникового заповнювача (t_3), – розміри елемента стільника уздовж осей OX і OY , (a_c, b_c), – товщина стільника (δ_c), – гострий кут нахилу сторін стільника b_c до осі OX (β); k_{np} – коефіцієнт переривчастості стільникового заповнювача; \tilde{D} – приведена циліндрична жорсткість тришарової панелі; E_z – приведені модулі пружності заповнювача; $[\sigma_i], E_i, \rho_i, i = 1, 2, 3$ – граничні значення напруг, модулів пружності і щільності шарів, E_0, μ_0, η_3 – приведені характеристики панелі.

Імітаційна модель міцності $F(\tilde{D})$, розрахована алгоритмами самоорганізації, виду $F_{II}(x) = 10^6 * (0.748 + 5.957(10^{-8} \tilde{D})^{1/3})$ мала погрішність до 6% в області значень

$E_z \in [2 \cdot 10^{10}; 2.1 \cdot 10^{11}]$, $P(x) \in [3.5 \cdot 10^6; 6.7 \cdot 10^6]$. Побудовано область Парето задачі, що встановлює зв'язок подовжнього навантаження $P(x)$ і ваги $G = Q(x)$ при лінійному зростанні $P(x)$, отримано що при збільшенні $P(x)$ активними ставали обмеження висоти конструкції і геометричних обмежень (28).

В роботі удосконалені методи розрахунків і досліджені компромісно-оптимальні властивості пружних стержневих і континуальних систем при складних впливах. У задачах стійкості пружних стержневих систем при оптимізації багатопараметричного навантаження розроблений метод апроксимації граничних поверхонь стійкості, де наближення області одержують шляхом її заміни опуклим m -мірним багатогранником. Вершини багатогранника $M_j(0, 0, \dots, F_j^*, \dots, 0)$ представляють координати парціальних критичних сил F_j^* у силовому просторі. Для визначення вершини апроксимуючого багатогранника в задачі стійкості необхідно задавати співвідношення між значеннями сил F_j / F_k пропорційно парціальним силам (F_j^*, F_k^*) . Отримано методику для розрахунку критичних сил утрати стійкості усіченої ребристої конічної оболонки, що знаходиться під впливом навантажень осьовими і боковими силами (P, q) , які представляють граничну поверхню стійкості (є областю Парето): устанавлює компромісно-оптимальні величини критичних сил для (P, q) . Розроблено моделі і методи розрахунку оптимальних за матеріалоемністю проектів конструкцій, досліджено компромісно-оптимальні властивості оболонок для різних видів навантажень (P, q) .

Виконано подальший розвиток методів параметричної оптимізації стержневих конструкцій, що знаходяться в умовах комбінованого, багатоваріантного навантаження, дії агресивного середовища. Для стержневих систем, що згинаються, функціонуючих в умовах агресивних середовищ, устанавлені властивості компромісної оптимальності типу сукупної суперечливості (16) між характеристиками: площа поперечного переріза, периметр, термін експлуатації. Розроблено спеціалізовані методи оптимального проектування статично визначених і статично невизначених стержневих систем (ферм і рам мінімальної маси при обмеженнях по міцності, переміщенню вузлів і геометричним розмірам поперечних перетинів), що використовують нелінійну апроксимацію обмежень і цільових функцій для забезпечення обчислювальної ефективності процедур проектування.

Встановлено шляхом статичних, динамічних і ударних випробувань піввагонів, що завантажуються трубами різних сортментів (розсіпом, в пакетах), а також при кінцево-елементному моделюванні систем, напружено-деформований стан стійок і стінок вагона. Розроблено технічні умови і компромісно-оптимальні схеми завантаження, які ураховують обмеження по сортаментах, формі і масі пакетів, технологічні вимоги і забезпечують зберігання рухомого складу при раціональному завантаженні піввагонів трубами.

У п'ятому розділі удосконалені методи формування моделей задач оптимального керування і проектування за даними пасивних експериментів, які характеризують процеси залізничних перевезень і режими тяги. Для задачі інтерпретації даних шляхом об'єднання підходів по представленню безперервних функцій багатьох перемінних (Колмогоров А.М.) і самоорганізації моделей (групове урахування аргументів, МГУА, Ивахненко А.Г.) розвинуті методи регресійного аналізу, в яких апріорі не потрібне завдання виду рівняння яке розраховується. Було необхідно по матриці $X = \|x_{ik}\|$; $\bar{y} = (y_1, \dots, y_m)^T$, $i = \overline{1, m}$; $k = \overline{1, n}$, і значенням вихідної перемінної Y одержати структури моделей $\{M_q(y, \bar{x}_{(q)})\}$, $\bar{x}_{(q)} \subseteq X_{(n)}$ і побудувати апроксимації $f_q = f_q(\bar{x}_{(q)})$ даних (X, Y) найкращим щодо найменших квадратів чином для представлення Y у наступному виді

$$f_q(x_{1q}, x_{2q}, \dots, x_{pq}) = \sum_{i=1}^{2p+1} \varphi_i(z_i = \sum_{j=1}^p a_{ij}(x_j)), \quad (29)$$

де $\varphi_i(\cdot)$, $a_{ij}(\cdot)$ – безперервні функції одного перемінного, $a_{ij}(\cdot)$ не залежать від виду функції $f_q(\cdot)$, вибираються довільно і заздалегідь фіксовані, а $\varphi_i(\cdot)$ (наприклад, квадратичні) визначаються за

даними (X, Y) . Структурами моделей були набори незалежних факторів $X_{(q)}$ і величини \bar{y} , формовані за допомогою відносини толерантності для $\{x_j\}_n$. У розділі розроблені алгоритми багатфакторного регресійного аналізу за даними (X, Y) , де шляхом самоорганізації вирішується задача вибору функцій $a_{ij}(\cdot) \in P_f = \{a_{(1)}(x), \dots, a_{(f)}(x)\}$ при завданні Y у формі (29). Виконано порівняння запропонованого методу з МГУА для задачі по аналізі і прогнозуванню динамічних коефіцієнтів стійкості колісної пари від всповзання на рейку, коли розглядався двохосьовий екіпаж з 9 ступенями волі при русі з різними швидкостями по шляху з нерівностями, що показало розходження в оцінках параметрів до 5%.

Встановлено, що одночасно з проявом стохастичних зв'язків між перемінними (X, Y) виникає задача по *детермінації спрямованості* зв'язку $X \rightarrow Y$. Розроблено і досліджено новий критерій детермінації $X \rightarrow Y$, що використовує відхилення умовних імовірностей від маргінальних значень, виду

$$K_{cl}(X \Rightarrow Y) = [d_{cl}(X \Rightarrow Y) / d_{cl}(Y \Rightarrow X)] < 1, \quad (30)$$

де

$$d_{cl}(X \Rightarrow Y) = \sum_{(i,j)} [P(y_j | x_i) - P(y_j)]^2; \quad d_{cl}(Y \Rightarrow X) = \sum_{(i,j)} [P(x_i | y_j) - P(x_i)]^2, \quad (31)$$

показано, що (30) – (31) дає більш точне рішення задачі, і придатний для дослідження дискретних і безперервних параметрів. Критерій (30) дозволяє підвищити адекватність і зменшити кількості параметрів моделей систем. За допомогою (30) удосконалені методи (багаторівневого) структурного моделювання й ефективно вирішені задачі по представленню даних про експлуатацію локомотивів.

Для уточнення розрахунків величини перемінної напруги на струмоприймачі електровоза удосконалений метод аналізу супутнього поїздопотокa (Почасвець Е.С., Савич Я.Ю.). Узагальнення методики складається в урахуванні особливостей струмоспоживання поїздів різних категорій (вантажних, пасажирських, високошвидкісних), а також використанні реальної структури поїздопотокa. Вважаючи, що в період часу ΔT_q має місце випадковий процес Пальма з щільністю відновлення $\lambda(t)$, уточнений доданок $\Delta U_{cn}(x, \Delta T_q)$ функції втрат напруги на струмоприймачі в місці x , що залежить від супутнього потоку поїздів, представлено у виді

$$\Delta U_{cn}(x, \Delta T_q) = \sum_k \left[\int_0^L (I_{\Lambda}^{(k)}(y) \lambda^{(k)}(t_y, \Delta T_q)) \int_0^x \psi(s, y) r_0(s) dy ds \right], \quad (32)$$

де

$I_{\Lambda}^{(k)}(y)$ – струмоспоживання середньозваженого поїзда категорії k , $\lambda^{(k)}(t_y, \Delta T_q)$ – функція щільності розподілу міжпоїздної інтервалу для категорії k на інтервалі ΔT_q , $\psi(s, x)$ – коефіцієнт розподілу струмів у місці s тягової мережі, $r_0(s)$ погонний опір тягової мережі. За рахунок розгляду різних категорій поїздів узагальнено логарифмічно нормальний закон, призначений для розрахунку імовірностей появи супутнього поїзда в деякому місці на перегоні через заданий інтервал часу.

Розроблено метод аналізу даних, що забезпечує високу ефективність прогнозування характеристик супутнього поїздопотокa на основі *нечітких величин*, а також використання методів експертних систем. Для розрахунку оцінок параметрів (часових, об'ємних) стохастичних графів, що характеризують рух поїздів по ділянці, отримані аналоги рівнянь Мейсона для замкнених потокових графів, навантажених нечіткими величинами з трикутними функціями. У розділі також розвинутий метод проектування конструкцій рухомого складу шляхом екстраполяції значень параметрів на основі моделей нечітких трикутних величин, застосований у розділі 4.

У розділі шість отримано рішення проблеми по зменшенню вартості електричної енергії, споживаної на тягу поїздів, вирішено нові задачі синтезу режимів тяги в умовах перемінної ціни електроенергії. Встановлено, що при урахуванні вартості попередні рекомендації з вибору режимів тяги стають недостатніми, а суттєве ускладнення методів розрахунку РК полягає у виникненні комбінаторної задачі по вибору оптимальних варіантів переведення тягових підстанцій на умови диференційованих тарифів. Для рішення цієї проблеми уперше для залізниць України розроблено стохастичну модель функції ціни електроенергії і запропоновано статистичні критерії з оцінки вигідності застосування перемінних тарифів для груп тягових підстанцій, які спрощують розрахунки режимних карт при відомих і прогнозованих методами моделювання обсягах електроспоживання на тягу поїздів.

Задача по розрахунку режимів тяги, оптимальних по вартості електроенергії, має вигляд (3) для показника F_C^* з обмеженнями, що відповідають розділу 2, коли ураховуються A^* – електроспоживання, випадкова функція $C(x,t)$ – ціна електроенергії в місці x в момент часу t . $C(x,t)$, істотно ускладнюючи задачу, дозволяє спільно розраховувати режими тяги і вибирати варіанти переведення на ДТ частини тягових підстанцій, щоб зменшити вартість електрооспоживання. Реалізація таких задач на практиці представляє складну проблему через її комбінаторний характер і високу розмірність (Придніпровська залізниця – 80 ТП), а також необхідність завдання матриць очікуваного споживання електроенергії на ділянках залізниць в різні періоди доби – $A_j = [A_{i,j}]_p$. Були розроблені і реалізовані методи рішення при відомих (прогнозованих) $A_j = [A_{i,j}]_p$, виконано розрахунок і дослідження компромісно- оптимальних РК і графіків швидкостей руху поїзда при відсутності матриць A_j методами векторної оптимізації.

На рис. 5 приведені типові графіки характеристик перемінної ціни електроенергії $C(t)$ в рамках ОРЕ (дані по Південно-Західній залізниці у 2002 р.); середні квадратичні відхилення і коефіцієнти варіації дані у масштабі. Виділено чотири часові зони, істотні щодо варіації ціни електроенергії, що враховується при розрахунках РК.

Рис. 5. Параметри ціни електроенергії спожитої на тягу по періодах в рамках ОРЕ

Рис. 6. Дільничні швидкості руху електропоїздів при оптимальних режимах керування в умовах ДТ на ділянці Вінниця-Казатин

(23 – 24, 0 – 6 година, перша; 8 – 10, година, друга; - 6 – 8, 10 – 18, 22 – 23 година, третя; 18 – 22 година, четверта). Для всіх періодів t розходження нижніх і верхніх значень ціни складало 8 – 9%.

Ціна електроенергії не є стаціонарним процесом, згідно критерію Колмогорова-Смирнова, на рівні значимості 5 % у кожному перетині випадковий процес “сформована в рамках ОРЕ ціна електроенергії” є нормально-розподіленою випадковою величиною, яка для розрахунків режимів тяги в умовах ОРЕ представлена у виді

$$C(x,t) = \{(N(M[c(x_k, t_1)], \sigma(x_k, t_1)), \dots, N(M[c(x_k, t_{24})], \sigma(x_k, t_{24})))\}_{k \in N_k} \quad (33)$$

де

$N(a, \sigma)$ – функція Гауса, $M[c(x_k, t_j)]$, $\sigma(x_k, t_j)$ – параметри нормального закону.

На рис. 6 приведені графіки оптимальних дільничних швидкостей руху, розрахованих згідно (3), (33) для того самого потяга, причому в першому випадку вартість спожитої електроенергії на 11% нижче; перший графік відповідає відправленню з Вінниці о 6 годині 30 хвилин, а другий – о 4 годині 30.

У розділі розроблений ряд моделей задачі з розрахунку оптимальних РК і виборі варіантів застосування ДТ тарифів при відомих матрицях споживання електроенергії, що розрізняються інформаційною базою. У комбінаторній моделі необхідно віднести N_T тягових підстанцій, до

$C = (C_t^{(k)}) = (C_1^{(k)}, C_2^{(k)}, \dots, C_{l_k}^{(k)})$ тарифів, $k = 1, 2, \dots, l$; $C_j^{(k)}(t)$ – коефіцієнти ціни по тарифі ‘ k ’ для періоду (t), що відноситься до часової зони ‘ j ’. Для $C_t^{(k)}$ задані матриці $A^{(k)} = [a_{ij}^{(k)}]$, $a_{ij}^{(k)}$ – оцінка (прогноз) електроспоживання підстанції ‘ i ’ у зоні ‘ $t = j$ ’ тарифу ‘ k ’. $X_{ik} \in \{0;1\}$ встановлює, що підстанція ‘ i ’ платить по тарифу ‘ k ’, якщо $X_{ik} = 1$. Необхідно знайти значення $X^* = \{X_{ik}^*\}$, $i = 1, 2, \dots, N_T$, $k = 1, 2, \dots, l$, що задовольняють вимогам

$$K_1 = S_{(l)} = \sum_{k=1}^l [\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^{l_k} a_{ij}^{(k)} C_j^{(k)} X_{ik})] \Rightarrow \min_{X_{ik} \in D_X \cap D_P}, \quad (34)$$

$$D_X = \{ \sum_{k=1}^l X_{ik} = 1; \quad i = 1, \dots, N_T \}, \quad X_{ik} \in \{0;1\}, \quad (35)$$

$$D_P = \{ (i, j) : i, j \in N_T; \sum_{(i,j) \in D_N} P(X_{ik}, X_{jk}) = 0; P(\alpha, \beta), \alpha, \beta \in \{0;1\}; k \in l \}. \quad (36)$$

Рівняння (35) показують, що ТП відносять до одного тарифу $C_t^{(k)}$; згідно (36) ТП із номерами $(i, j) \in D_N$ відносять до одного $C_t^{(k)}$; $D_j \subseteq N_T \times N_T$. Для реалізації задачі (34) – (36) розроблені переборні і генетичні алгоритми. Крім (34) – (36) були побудовані векторна вартісно-технологічна модель задачі, де додатково задається граф технологічної зв'язності підстанцій, а також модель для оперативного регулювання переключеннями ТП за умовою мінімуму вартості електроенергії, що надходить із систем зовнішнього енергопостачання в період (t).

Через складність рішення задач (34) – (36) у загальному виді розроблені методи послідовної побудови оптимальних РК і наближені критерії для важливого випадку оцінки ефективності переведення на перемінні тарифи заданої групи ТП. У рамках постановок двохетапних задач стохастичного програмування були розроблені уточнені критерії по застосуванню перемінних тарифів при розрахунках РК виду

$$M_{(c,\alpha)}[\tilde{c}, \tilde{\alpha}] = \sum_i \{ (\tilde{c}_i * \tilde{\alpha}_i) + M[\Delta\alpha_{ik} p_{ik}] * \tilde{\alpha}_i \} < c_0, \quad (37)$$

де $\alpha_i = A_i^s / A_s$, $\sum \alpha_i = 1$; $A_i^s = \sum_{j \in J_A} A_{i,j}$, $i = 1, 2, 3$; $A_s = \sum_i A_i^s$; c_0 – ціна єдиного тарифу (1 для відносних цін), $\tilde{\alpha}$ – випадкова величина питомого споживання електроенергії, \tilde{c}_i , $\Delta\alpha_{ik}$ – середні і відхилення від них в i -ому періоді, p_{ik} – імовірність k -ого інтервалу відхилень; \tilde{c} , $\tilde{\alpha}$ – випадкова величина ціни і її середнє для i -ого періоду; $M[*]$ - знак математичного очікування. Для застосування (37) будується закон розподілення відхилень випадкових величин питомого споживання електроенергії в кожному i -ому періоді таблиці тарифів, де p_k – значення імовірностей:

$$\frac{\Delta\alpha_k}{p_k} \mid \frac{\Delta\alpha_{k1}}{p_{k1}} \mid \frac{\Delta\alpha_{k2}}{p_{k2}} \mid \frac{\Delta\alpha_{k3}}{p_{k3}} \mid \dots \mid \frac{\Delta\alpha_{ki}}{p_{ki}} \mid \dots \mid \frac{\Delta\alpha_{km}}{p_{km}}. \quad (38)$$

Розроблено також критерій ефективності для застосування в ОРЕ, який враховує \tilde{c} , $\tilde{\alpha}_q$, Δc_{iq} – випадкові величини ціни, середні і відхилення від середніх в i -ій годині, p_{iq} – імовірності q -ого інтервалу відхилення значень ціни від середніх значень. Закони розподілу відхилень $\frac{\Delta c_{qi}}{p_{qi}}$ подібно (38) будуються для всіх часових зон, врахованих у моделі ОРЕ. Розрахунки за критерієм

(37) для даних споживання електроенергії на ділянці Нікополь – Марганець Придніпровської залізниці, отриманих з використанням мікропроцесорних лічильників Альфа у жовтні 1998 р., показали, що перехід на ДТ дозволяє зменшити вартість електроенергії на 6.5 %. Розрахунки ефективності застосування ДТ виконано для всіх областей Південно-Західної залізниці.

Згідно (37) встановлено шляхом аналізу графіків руху з оцінкою динамічного поїзного положення (розподілу приведених мас поїздів у часі) для Дніпропетровської дирекції перевезень, що використання ДТ дозволяє зменшити вартість електроенергії на 6.5%, а перехід на закупівлю електроенергії на умовах ОРЭ – на 3.9%. У розрахункових випадках оптимальні за критерієм мінімуму вартості електроенергії РК давали зменшення вартість електроенергії, спожитої на тягу, на 8 – 12%.

У розділі також розроблено метод розрахунку режимів тяги поїзда в умовах оптового ринку електроенергії з використанням технології експертних систем. Особливістю методу є моделювання поїзного положення, а також умовне агрегування експериментальних даних про процеси перевезень, що дозволяє автоматизувати формування баз знань експертних систем по розрахунку режимів тяги поїзда.

ВИСНОВКИ

В дисертації розв'язано актуальну проблему ефективного використання вектору ресурсів систем перевезень залізниць. Отримані нові рішення комплексної проблеми розрахунку режимів тяги поїздів, оптимальних по вартісним показникам за умов перемінних тарифів оплати електроенергії. Розроблені в дисертації удосконалені методи оптимального проектування конструкцій рухомого складу та розрахунку режимів тяги поїздів при векторі цільових показників ресурсів, методи векторної оптимізації в ієрархічних системах, розрахунково-експериментальні екстраполяційні методи проектування та математичного моделювання за даними спостережень дозволили отримати нові більш повні рішення, що адекватні складним умовам реалізації досліджуваних процесів. Вони можуть бути використані для ефективного вирішення задач проектування конструкцій рухомого складу і управління стохастичними технологічними процесами залізниць по вектору ресурсів систем. Основні наукові результати, висновки і рекомендації дисертації полягають у наступному.

1. Установлено потребу подальшого розвитку комплексних задач оптимальної організації процесу перевезень, удосконалення режимів тяги і конструкцій рухомого складу, створено наукові основи по рішенням стохастичних задач управління тягою і проектування конструкцій рухомого складу при векторі показників ресурсів, які повніше ураховують різноманітні вимоги до оптимальних об'єктів і систем.

2. На засадах системного аналізу розроблено удосконалену багаторівневої модель з розрахунку компромісно-оптимальних режимів тяги поїздів, що охоплює процеси перевезень (моделі поїздопотоків, вагонопотоків), електротягову мережу (ураховує змінність напруги і ціни електроенергії), стохастичні моделі руху поїзда, для якої створено методи щодо ідентифікації параметрів за даними діючих інформаційних систем залізниць і забезпечення ефективної реалізації розрахунків.

3. Розроблено теоретичні основи і одержано рішення проблеми розрахунку режимів тяги поїздів, оптимальних по вартості при перемінних тарифах плати.

3.1. Встановлена суттєва відмінність режимів ведення поїзда, оптимальних за вартісним показником, від режимних карт що оптимальні по критерію мінімуму електроспоживання на тягу. Розроблено методи розрахунку компромісно-оптимальних режимів тяги поїздів.

3.2. Для розрахунку режимних карт в умовах оптового ринку електроенергії вперше розроблено стохастичну модель ціни як нестаціонарної функції часу, що відповідно критерію Колмогорова – Смирнова для кожної години доби є гаусовою випадковою величиною; встановлено що при розрахунках з достатньою точністю можна враховувати чотири зони значимої зміни ціни (23 – 24, 0 – 6 год.; 8 – 10 год.; 6 – 8, 10 – 18, 22 – 23 год.; 18 – 22 год.).

3.3. Встановлено, що суттєве ускладнення методів розрахунку режимів тяги, оптимальних за вартісним показником, полягає у виникненні комбінаторної задачі по вибору оптимальних варіантів переведення тягових підстанцій на умови диференційованих тарифів. Розроблено комплекс відповідних моделей і пошукових та ітераційних методів розрахунку режимів тяги поїздів для відо-

мих матриць електроспоживання електрифікованих ділянок і методи прогнозування параметрів матриць шляхом моделювання графіків руху поїздів різних категорій (вантажних, пасажирських, швидкісних, приміських, тощо).

3.4. Запропоновано статистичні критерії оцінки вигідності перемінних тарифів для заданої множини тягових підстанцій при розрахунках режимних карт, які використовують закони розподілення випадкових величин для відхилень показників ціни і електроспоживання, які можуть бути отримані із діючих інформаційних систем Укрзалізниці, або шляхом моделювання графіків руху поїздів різних категорій.

4. Одержано подальший розвиток теорії і методів розрахунку режимів ведення поїзда при урахуванні стохастичних властивостей задачі.

4.1. Встановлено за допомогою нерівностей Ієнсена можливості розбіжностей між результатами рішень стохастичних задач оптимального керування рухом поїзда при управлінні позиціями контролера і урахуванні перемінності напруги в тяговій мережі та їх детермінованих еквівалентів, в яких напруга дорівнює математичному очікуванню. Встановлено, що розбіжність пов'язана з неопуклою наверх тягових і струмових характеристик двигуна електровоза, а також зі структурою рівнянь нагрівання тягового двигуна на протязі руху.

4.2. Розроблено двохетапний метод розрахунку режимів ведення поїзда, стійких до стохастичних властивостей напруги на струмоприймачі електровоза, в рамках якого додатково ураховуються витрати електроенергії від активного струму двигуна електровоза і використовується інформація про закон розподілення заданих інтервалів значень напруги в тяговій мережі.

4.3. На базі розрахунків і аналізу оптимальних за електроспоживанням графіків руху пасажирських поїздів стохастична задача зведена до регулювання відносно відомих еталонних режимів тяги, і за допомогою методики Ю.П. Петрова побудовано оптимальний лінійний регулятор по розрахунку режимів ведення поїзда з урахуванням перегрівання тягових двигунів.

4.4. Розроблено удосконалений метод розрахунку оптимальних режимів тяги поїзда, призначений для ефективного рішення стохастичних задач і побудови компромісно-оптимальних режимів, в якому при застосуванні квадратичної апроксимації функцій, лінійної апроксимації обмеження по терміну руху, а також неперервного динамічного програмування отримують аналітичне рішення для значень швидкостей руху по ділянках, що дозволяє на порядок зменшити час розрахунків.

4.5. Встановлено шляхом розрахунків компромісно-оптимальних режимів ведення пасажирських і приміських поїздів можливість в умовах застосування диференційованих тарифів на ділянках Південно-Західної залізниці зменшити вартість електроенергії на 11,6% за рахунок збільшення електроспоживання на 11,1%. В цілому режимні карти, оптимальні за вартістю електроенергії, дозволяють зменшити плату за електроспоживання на тягу до 8 – 12 %.

5. Одержано подальший розвиток і удосконалення методів векторної оптимізації, призначених для ефективного рішення досліджуваних в роботі комплексних задач з показниками ресурсів систем.

5.1. Удосконалені методи розрахунку множин компромісно-оптимальних рішень задач векторної оптимізації із застосуванням рівномірних числових $ЛП_τ$ -послідовностей, умов узгодженості компонентів цілі, з урахування умов невизначеності переваги компонентів цілі. Це забезпечило можливість ефективного рішення векторних задач оптимального управління тягою поїзда з показниками споживання і вартості електроенергії, задачі проектування конструкції захисту днища вагона-цистерни, а також задачі по розрахунку раціональних схем завантаження піввагонів трубами.

5.2. На підставі дослідження комплексних задач з показниками ресурсів розроблено метод векторної оптимізації, що полягає у аксіоматичному визначенні принципу компромісу з властивостями симетрії і ефективності для єдиного рішення, а також включає методика розрахунку вагових коефіцієнтів часткових показників за даними про аналоги систем. За допомогою методу досліджено компромісні властивості граничних поверхонь стійкості пружних стержневих систем і підкріплених оболонок при багатоваріантному навантаженні.

5.3. Для рішення багаторівневих векторних задач по розрахунку режимів тяги отримано узагальнення принципу мінімаксу і удосконалено метод аналізу ієрархії системи показників цілі, який

не потребує строгої ієрархії компонентів вектора, може застосовуватися при залежності переваги показників від альтернатив і при неопуклих моделях задач векторної оптимізації.

6. Отримано подальший розвиток методів оптимального проектування конструкцій рухомого складу.

6.1. Удосконалено за рахунок застосування лінійної та нелінійної екстраполяції у просторі параметрів методи проектування конструкцій підвищення в задачі максимізації критичних швидкостей стійкості руху (електровоз ДСЗ) Встановлено, що проектування на базі методів екстраполяції з використанням нечітких величин суттєво зменшує обсяг розрахунків і подальших випробувань складної техніки.

6.2. Удосконалено метод проектування захисту днища вагонів-цистерн від дії наднормативних подовжніх ударів автозчеплювачем при урахуванні вектору показників оптимальності і формуванні методами самоорганізації моделей-замісників системи обмежень при кінцево-елементній дискретизації задачі. Застосування методу для проектування конструкції захисту (мінімальної маси, вартості, максимальної міцності) у вигляді тришарової металеві пластины з металевим стільниковим заповнювачем підтвердило коректність і обчислювальну ефективність цих процедур.

6.3. Отримано подальший розвиток методів параметричної оптимізації стержневих і оболонкових конструкцій, що знаходяться в умовах комбінованого, багатоваріантного навантаження, дії агресивного середовища.

6.3.1. Для задач оптимізації m -варіантного навантаження пружних стержневих систем (рами) розроблений метод розрахунку компромісно-оптимальних значень критичних сил у формі апроксимації опуклої граничної поверхні стійкості оптимальним m -мірним багатогранником з одною вершиною. Установлено, що таке представлення дає достатню для практики точність розрахунків критичних сил, а вершина багатогранника визначається при завданні відносин критичних зусиль F_j / F_k пропорційно значенням відповідних парціальних критичних сил. Ефективність апроксимації встановлено при дослідженні компромісно-оптимальних проектів усічених конічних оболонок, підкріплених подовжніми і кільцевими ребрами, з мінімальною масою при дії осьових, бічних (зовнішній, внутрішній) і комбінованих сил.

6.3.2. Для стержневих систем, що згинаються, функціонуючих в умовах агресивних середовищ уперше встановлені властивості компромісної оптимальності типу сукупної суперечливості між характеристиками: площа поперечного перерізу, периметр, термін експлуатації.

6.4. Розроблено спеціалізовані методи оптимального проектування статично визначених і статично невизначених стержневих систем (ферм і рам мінімальної маси при обмеженнях по міцності, переміщенню вузлів і геометричним розмірам поперечних перетинів), що використовують нелінійну апроксимацію обмежень і цільових функцій для забезпечення обчислювальної ефективності процедур проектування.

6.5. Встановлено шляхом статичних, динамічних і ударних випробувань піввагонів, що завантажуються трубами різних сортamentів (розсипом, в пакетах), а також при кінцево-елементному моделюванні систем, напружено-деформований стан стійок і стінок вагона. Розроблено технічні умови і компромісно-оптимальні схеми завантаження, які ураховують обмеження по сортamentам, формі і масі пакетів, технологічні вимоги і забезпечують зберігання рухомого складу при раціональному завантаженні піввагонів трубами.

7. Розвинуто методи формування моделей досліджуваних задач оптимізації за даними експериментів, які накопичуються в інформаційних системах залізниць.

7.1. Удосконалено методику регресійного аналізу даних спостережень за рахунок поєднання методів структурного моделювання та самоорганізації моделей, коли апріорі не потрібне завдання виду рівняння регресії, яке розраховується. Для задачі аналізу і прогнозуванню динамічних коефіцієнтів стійкості для колісних пар двохосьового рейкового екіпажу з 9 степенями вільності порівняння запропонованого методу з МГУА дало відмінність результатів до 5%.

7.2. Для забезпечення адекватності і зменшення кількості параметрів моделей складних систем, що формуються за даними спостережень, удосконалено методи структурного математичного моделювання шляхом розробки критерію, що дозволяє встановити напрямок стохастичних залеж-

ностей між змінними, в якому ураховуються відхилення умовних імовірностей від їх маргінальних значень. Встановлено, що цей критерій є найбільш точним серед відомих.

7.3. Для розрахунку режимів тяги виконано подальший розвиток методів аналізу і прогнозування параметрів поїздопотоків за даними моніторингу процесу перевезень шляхом удосконалення методів експертних систем, а також модифікації потокових графів для обробки даних, представлених нечіткими величинами, що дозволяє отримати більш точну модель стохастичної задачі. Запропонований метод експертних систем використано також для визначення зон сталої ціни в рамках оптового ринку електроенергії, що спрощує метод розрахунків оптимальних режимів тяги.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ПРАЦЬ

1. Герасимов Е.Е., Почтман Ю.М., Скалозуб В.В. Многокритериальная оптимизация конструкций.– Киев-Донецк: Вища школа, 1985, - 134 с.
2. Заруцкий В.А., Почтман Ю.М., Скалозуб В.В. Оптимизация подкрепленных цилиндрических оболочек. – Киев: Вища школа, 1990, - 138 с.
3. Блохин Е.П., Скалозуб В.В. Выбор режимов ведения поездов как стохастическая задача векторной оптимизации // Транспорт. Збірн. наук. праць ДШТУ. Вип. 7. Дніпропетровськ: Наука і освіта. 2001. – С. 28-31.
4. Блохин Е.П., Скалозуб В.В. Анализ и моделирование компонентов системы поезд – электропоездная сеть // Транспорт. Зб. наук. праць ДНУЗТ, вып. 9. – Дніпропетровськ, 2001. – С. 23 – 30.
5. Блохин Е.П., Пшинько А.Н., Евдомаха Г.В., Скалозуб В.В., Землянов В.Б. Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов //Залізничний транспорт України, №6, 2001. – С. 19-22.
6. Блохин Е.П., Евдомаха Г.В., Скалозуб В.В. Модель оптимального регулятора для управления движением пассажирского поезда. // Транспорт. Зб. наук. праць, вип. 10. – Дніпропетровськ, 2002. – С. 58 – 65.
7. Скалозуб В.В. Модели и методы расчета компромиссно-оптимальных режимов движения поезда //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 3(20). – Дніпропетровськ, 2002. – С. 137 – 146.
8. Скалозуб В.В., Железнов К.И. Оптимизация режимов ведения поездов на основе непрерывного динамического программирования // Математичне моделювання. Дніпродзержинськ: ДДТУ, №2, 2002, – С. 32 – 36.
9. Скалозуб В.В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии // Транспорт. Зб. наук. праць, вип. 12. – Дніпропетровськ, 2002. – С. 148 – 157.
10. Почтман Ю. М., Скалозуб В. В. Аксиоматический подход к многокритериальной оптимизации конструкций // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1984. № 6. – С. 153 - 156.
11. Скалозуб В.В. О выборе принципа оптимальности в многокритериальных задачах оптимизации конструкций // Моделирование и оптимизация сложных механических систем. Сб. научн. тр. / АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. Киев. 1990. – С. 50 - 55.
12. Скалозуб В.В. Параметризация задач векторной оптимизации конструкций // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Т. 2. Дніпропетровськ: Навчальна книга, 1998. – С. 92 - 98.
13. Скалозуб В.В. Многоэтапные процедуры векторной оптимизации, использующие аксиоматику компромиссов // Компьютерные методы в задачах прикладной математики и механики. Сб. научн. тр. / АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. Киев, 1997. – С. 117 – 123.
14. Скалозуб В.В. Апроксимація компромісно-оптимальних розв'язків задач оптимального проектування за допомогою інтервалів невизначенності переваги критеріїв.// Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Т4. - Дніпропетровськ: Навчальна книга, 1998. – С. 92 – 97.

15. Скалозуб В.В. Аксиоматика компромисса в обратных задачах многокритериальной оптимизации конструкций и технических систем // Математические методы в задачах расчета и проектирования сложных механических систем Сб. научн. тр. / АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. - Киев, 1992. – С. 62 – 65.
16. Блохин Е. П., Богомаз Г. И., Скалозуб В. В., Соболевская М. Б. Оптимальное проектирование конструкций защиты железнодорожных цистерн от сверхнормативных продольных нагрузок // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Том 6. Дніпропетровськ: Навчальна книга, 1999. – С. 18 – 27.
17. Блохин Е.П., Коротенко М.Л., Рейдемейстер А.Г., Скалозуб В.В. Экстраполяционные методы оптимизации в задаче обеспечения устойчивости движения электровоза ДСЗ. // Сб. научн. трудов Национальной горной академии Украины, №13, том 3. – Дніпропетровськ: Навчальна книга, 2002. – С. 123 – 128.
18. Pochtman Y. M., Skalozub V.V., Nagorny D.V. Axiomatic approach to the multicriteria structural optimization . Polska Akademia Nauk Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, 5; 1998. – P. 245 – 251.
19. Брынза А.А., Скалозуб В.В. Оптимизация многопараметрического нагружения в задачах устойчивости упругих стержневых систем // Проблемы вычислительной механики и прочности конструкций, Том 1. – Днепропетровск, 1997. – С.20-26.
20. Санников Ю.А., Скалозуб В.В. Весовая оптимизация ребристых конических оболочек при продольном, боковом и комбинированном нагружении // Гидроаэромеханика и теория упругости. Нелинейные задачи механики идеальных вязкоупругих и упруго-пластических сред. – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1991. С. 101 – 107.
21. Скалозуб В.В., Зеленцов Д.Г., Солодка Н.А. Исследование компромиссно-оптимальных свойств изгибаемых стержней, работающих в агрессивных средах. //Будівництво. Зб. наук. праць ДПТУ, вып. 6. – Дніпропетровськ, 1999. С. 163 – 167.
22. Скалозуб В.В., Кириченко А.И. Векторная оптимизация процессов оперативного распределения порожних вагонов между пунктами погрузки // Системні технології, №5, 2001. – С. 110 – 115.
23. Скалозуб В. В., Цейтлин С. Ю. Процедура многоуровневой оптимизации при зависимых по предпочтению критериях // Матем. моделювання в інженерн. і фінанс. – економічн. задачах. Зб. наук. пр. ДПТ. – Дніпропетровськ: Січ, 1998. – С. 153 – 161
24. Скалозуб В.В. Структурная идентификация и имитационное моделирование в многокритериальных задачах оптимального проектирования конструкций // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Том 3. - Днепропетровск: Навчальна книга, 1998. – С. 112 - 121.
25. Брынза А.А., Скалозуб В.В., Шатунов А.В., Цупров С.П. К проблеме перевозки труб в полувагонах // Залізничний транспорт України, №4 (19), 2000. – С. 35 – 38.
26. Скалозуб В.В. Параметрическая оптимизация стержневых систем методом нелинейной аппроксимации // Математическое моделирование задач прочности и оптимального проектирования конструкций: Сб. научн. тр. / АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. Киев, 1993. – С. 37 – 41.
27. Скалозуб В.В., Литвин В.А., Холоша В.В. О построении прогнозирующих моделей оценки динамических характеристик железнодорожных экипажей // Транспорт. Нагруженность и прочность подвижного состава /Сб. научн. тр. ДИИТа. – Днепропетровск: Наука и образование, 1998. – С. 101 – 107.
28. Скалозуб В. В. Комбинированные алгоритмы многофакторного регрессионного анализа //Проблемы управления и информатики, №5, 1999. – С. 132-137.
29. Скалозуб В. В. Критериальная модель для анализа направленности стохастических связей переменных // Транспорт. Математичне моделювання в інженерних і економічних задачах транспорту. Зб. наук. пр. ДПТУ. Дніпропетровськ: Січ, 2000. – С. 104 – 112.

30. Скалозуб В.В. Многоуровневое структурное моделирование по результатам наблюдений на основе критериев идентификации направленности зависимостей переменных // Математичне моделювання. - Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1(4), 2000, – С. 51 – 54.

31. Скалозуб В.В., Цейтлин С.Ю., Великодний В.В., Андрущенко В.А. Объектно-ориентированные модели стохастических нестационарных потоков в транспортных сетях // Системні технології, №3 (14), 2001. – С. 141 – 150.

32. Землянов В.Б., Скалозуб В.В., Доманский В.В. Интегрированная информационная технология перевода тяговых подстанций на многотарифную оплату за потребленную электроэнергию // Залізничний транспорт, №3, 2000. – С. 41 – 43.

33. Скалозуб В.В., Евдомах Г.В., Дробаха В.И. Исследование режимов ведения поездов с учетом переменных тарифов оплаты электроэнергии // Системні технології, №3' (26), 2003. – С. 142 – 150.

ДОДАТКОВІ ПРАЦІ

34. Босов А.А., Скалозуб В.В. О Парето оптимальных решениях задач векторной оптимизации. // Диференціальні рівняння та їх застосування. Збірник наукових праць. Дніпропетровськ, ДДУ. 1998. – С. 66 – 70.

35. Босов А.А., Скалозуб В.В. Методы анализа направленности связей переменных в задачах структурного математического моделирования // Міжнародна наук. конф. Автоматика-2000, Львів, 11-15 вересня 2000. Праці. Т. 6. – С. 69 – 73.

АННОТАЦІЯ

Скалозуб В.В. Ресурсосберегающие методы управления тягой поездов и совершенствования конструкций подвижного состава. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.07 – подвижной состав железных дорог и тяга поездов. Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Днепропетровск, 2003.

Диссертация посвящена проблеме повышения эффективности процесса перевозок путем развития ресурсосберегающих методов управления тягой поездов с учетом условий неполной информации и методов усовершенствованию конструкций подвижного состава при векторном показателе эффективности. В работе созданы многоуровневые математические модели, охватывающие процесс перевозки (модели поездопотока), электротяговую сеть (учет переменности напряжений на токоприемнике и цены электроэнергии), стохастические модели движения поезда, и получены новые решения комплексной проблемы по расчету режимов ведения поездов, оптимальных по стоимостным показателям в условиях переменных тарифов платы за электроэнергию (дифференцированные тарифы, оптовый рынок).

Установлены существенные различия режимов тяги, оптимальных по стоимости и расходу электроэнергии, разработаны методы расчета компромиссно-оптимальных режимных карт. Для расчетов режимов движения в условиях оптового рынка электроэнергии Украины впервые разработана стохастическая модель цены как нестационарной функции времени, которая в каждом сечении является гауссовой случайной величиной, причем на практике можно учитывать четыре зоны значимых изменений цены электроэнергии. Разработан комплекс моделей и методов расчета режимов тяги поездов, оптимальных при переменных тарифах, с выбором вариантов перевода тяговых подстанций на дифференцированный тариф при известных и прогнозируемых матрицах электропотребления участков. Предложены статистические критерии оценки выгоды применения переменных тарифов.

Установлены различия между решениями стохастических задач оптимального управления движением поезда путем выбора позиций контроллера при учете переменности напряжений на токоприемнике и их детерминированными эквивалентами, где напряжения равны математическому ожиданию. Разработан двухэтапный метод расчета устойчивых к стохастическим свойствам напряжений на токоприемнике электровоза режимов тяги, использующий законы распределения для интервалов напряжений в тяговой сети. На основе анализа оптимальных по расходу электро-

энергии режимов тяги пассажирских поездов с помощью методики Ю.Н. Петрова построен оптимальный линейный регулятор по расчету режимов ведения поезда с учетом перегрева тяговых двигателей. Усовершенствован метод расчета режимных карт, в рамках которого на основе квадратической аппроксимации функций, линейной аппроксимации ограничения по времени движения, а также непрерывного динамического программирования получены аналитические решения для оптимальных участковых скоростей движения при управлении позициями контроллера, что на порядок повысило эффективность расчетов. Установлено, что для пассажирских поездов оптимальные по стоимости режимные карты позволяют уменьшить плату за потребленную на тягу электроэнергию на 8 – 12 %.

Развиты методы векторной оптимизации с целевыми показателями ресурсов систем: – получен набор усовершенствованных методов по расчету компромиссно-оптимальных решений; – разработан метод векторной оптимизации, состоящий в аксиоматическом определении принципа компромисса со свойствами симметрии и эффективности по Парето для единственного решения, включающий методику расчета коэффициентов важности по данным об аналогах систем; – усовершенствован метод анализа иерархической системы показателей векторной цели, предложено обобщение принципа минимакса для многоуровневых задач, исследуемых в работе.

Усовершенствованы методы оптимального проектирования конструкций подвижного состава. На основе методов линейной и нелинейной экстраполяции в пространстве параметров получено развитие задачи по обеспечению устойчивости движения железнодорожных экипажей (электровоз ДСЗ) за счет оптимизации параметров конструкции подвешивания, представленной в виде максимизации критических скоростей. Развиты методы оптимального проектирования при конечно-элементной дискретизации задачи, в которых путем самоорганизации моделей выполняется аппроксимация функций ограничений, использованные для проектирования конструкций оптимальной защиты днища вагона-цистерны от сверхнормативных продольных ударов в виде трехслойных металлических пластин с сотовым наполнителем.

Получено развитие методов параметрической оптимизации стержневых и оболочечных конструкций, находящихся под воздействием многовариантного и многопараметрического нагружения, и при действии агрессивной среды. Для задачи m -вариантного нагружения упругих стержневых систем (рамы) разработан метод расчета компромиссно-оптимальных значений критических сил в форме аппроксимации выпуклой пограничной поверхности устойчивости оптимальным m -мерным многогранником с одной вершиной. Эффективность метода аппроксимации показана при исследовании компромиссно-оптимальных проектов усеченных конических оболочек, подкрепленных продольными и кольцевыми ребрами, минимальной массы при действии осевых, боковых (внешних, внутренних) и комбинированных сил. Разработаны эффективные специализированные методы оптимального проектирования статически определимых и статически неопределимых стержневых систем (фермы и рамы минимальной массы), использующие нелинейную аппроксимацию целевой функции и ограничений.

Развиты методы по формированию математических моделей задач оптимизации по данным пассивных экспериментов, представленным в информационных системах железнодорожного транспорта. Усовершенствованы методы регрессионного анализа за счет объединения принципов структурного моделирования и самоорганизации моделей. Разработан уточненный критерий детерминации направленности стохастических зависимостей между переменными, использующий отклонения условных вероятностей от их маргинальных значений. Модифицирована модель потоковых графов для обработки данных, представленных нечеткими величинами, которая используется совместно с методами экспертных систем для прогнозирования параметров межпоездных интервалов при расчетах режимных карт ведения поезда.

Разработанные модели и методы в совокупности составляют научные основы по решению комплексных задач оптимального проектирования конструкций подвижного состава и оптимального управления стохастическими процессами тяги поездов по вектору показателей ресурсов для систем железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: система, ресурсы, режимы тяги, стохастические процессы, векторная оптимизация, стоимость и электропотребление, переменные тарифы, защита днища цистерны, критическая скорость движения, пассивный эксперимент.

АНОТАЦІЯ

Скалозуб В.В. Ресурсозберігаючі методи управління тягою поїздів і удосконалення конструкцій рухомого складу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2003.

Дисертація присвячена проблемі підвищення ефективності процесу перевезень шляхом розвитку ресурсозберігаючих методів управління тягою поїздів з урахуванням умов неповної інформації і методів удосконалення конструкцій рухомого складу при векторному показнику ефективності. В роботі створено математичні моделі, методи і отримано нові рішення комплексної проблеми розрахунку режимів тяги поїздів, оптимальних по вартісним показникам за умов перемінних тарифів (диференційовані тарифи, оптовий ринок електроенергії). Розроблено удосконалені методи оптимального проектування конструкцій рухомого складу (система підвищення електровою, трьохшаровий захист днища цистерн, рами) та розрахунку режимів тяги поїздів при векторі показників ресурсів, методи оптимізації для ієрархічних показників цілі, розрахунково-експериментальні екстраполяційні методи проектування та структурного математичного моделювання за даними пасивних експериментів, що дозволило отримати нові більш ефективні рішення задач оптимального управління тягою поїздів і проектування конструкцій рухомого складу.

Розроблені моделі, методи і програмне забезпечення в сукупності складають наукові основи, призначені для розв'язання комплексних задач оптимального проектування конструкцій рухомого складу і управління стохастичними процесами тяги поїздів по вектору показників ресурсів систем залізничного транспорту.

Ключові слова: система, ресурси, режими тяги, стохастичні процеси, векторна оптимізація, вартість і електроспоживання, перемінні тарифи, захист днища цистерни, критична швидкість.

THE SUMMARY

Skalozub V.V. The resource-saving methods of train traction management and improvement of the rolling-stock construction. - Manuscript.

Thesis for awarding of a scientific doctor degree of the technical science on a speciality 05.22.07 – rolling-stock of railways and traction of train. The Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan. Dnepropetrovsk, 2003.

The dissertation is devoted to the problem on the increase of the train transportation process efficiency by means of developing either the resource-saving methods of train traction management in view of incomplete information conditions or the methods of improving the rolling-stock constructions at a vector parameter of efficiency. In the present work the mathematical models and methods are developed and > new solutions to the complex problem of calculation of train traction modes are obtained. These solutions are optimum in cost parameters under the conditions of the variable tariffs (differential duties, whole sale market of the electric power). The advanced methods of optimum designing of the rolling-stock construction (system of an electric locomotive suspension, three-layered protection of tank bottom frame) and the calculation of train traction modes at a vector of resource parameters are developed. The method of optimization for the hierarchy parameters of a purpose, the calculation experimental extrapolation methods of designing and structural mathematic modelling within the data of passive experiments, that allow to obtain new more effective solutions of the problems on optimum train traction management and designing the rolling-stock construction.

As the whole, the developed models, methods and software form a scientific basis for the decision of the complex tasks on optimum designing of rolling-stock construction and management by processes of train tractions on the vector of resource parameters of a railway transportation system.

Keywords: system, resources, modes of traction, vector optimisation, cost and current consumption, variable tariffs, protection of tank bottom, critical speed.

Скалозуб Владислав Васильович

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ТЯГОЮ ПОЇЗДІВ
І УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ РУХОМОГО СКЛАДУ

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Підписано до друку 07.10. 2003.
Формат 60Ч84 1/16. Папір для множних апаратів. Ризограф.
Ум. друк. арк. 2.1. Обл.- вид.л.1,9. Тираж 100 прим.
Замовл. № 2818. Безкоштовно.

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

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