

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

**Ліпчанський Максим Валентинович**

УДК 681.5:681.518

**МОДЕЛЮВАННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ ТА КОНТРОЛЬ СИСТЕМ  
КЕРУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ ПРИМІСЬКОГО СПОЛУЧЕННЯ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2008

Дисертація є рукопис

Робота виконана у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Заповловський Микола Йосипович**,  
Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут", м. Харків,  
декан факультету комп'ютерних та  
інформаційних технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Самородов Вадим Борисович**,  
Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут"  
завідувач кафедри автомобіле- і  
тракторобудування

кандидат технічних наук, доцент  
**Ситнік Борис Тимофійович**,  
Українська державна академія залізничного  
транспорту, м. Харків,  
доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем

Захист відбудеться " 13 " листопада 2008 року о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий " 26 " вересня 2008 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Гамаюн І.П.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Задача створення інформаційно-керуючих та контролюючих систем (ІККС) для поїздів рухомого складу приміського сполучення є актуальною, оскільки, ці системи забезпечують оптимізацію енергетичних показників, контроль статичних і динамічних характеристик процесів, які відбуваються у електромеханічних системах об'єктів керування. Приміські електро- та дизель-поїзди з тяговими електродвигунами постійного та змінного струмів є складними об'єктами керування, які споживають значну кількість енергоресурсів, тому застосування ІККС щодо скорочення енерговитрат є перспективним.

Відповідно до Державної програми "Розвиток рейкового рухомого складу соціального призначення для залізничного транспорту й міського господарства" (Постанова Кабінету Міністрів України (КМУ) № 769 від 2.06.98) та "Концепції Державної цільової програми впровадження на залізничних шляхах швидкісного руху пасажирських поїздів на 2005 – 2015 рр." (розпорядження КМУ № 979-р від 31.12.04) актуальним є впровадження під час створення нового покоління рухомого складу приміських поїздів ресурсозберігаючих технологій, які можуть бути реалізовані за допомогою комп'ютерних інформаційних систем, та застосування оптимальних керувань, що складає напрямок дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі обчислювальної техніки та програмування НТУ "ХПІ" у рамках держбюджетної теми МОН України "Розробка теорії й методів штучного інтелекту для моделювання та оптимізації динамічних об'єктів" (№ ДР 0104U003016), за якою здобувач був виконавцем окремих розділів, і госпдоговірних тем: "Розробка на основі інформаційних технологій та методів штучного інтелекту системи керування дизель-поїзда" (АТЗТ "Техноімпекс", м. Харків), "Розробка алгоритмів і програм для реалізації системи управління, діагностики і контролю дизель-поїзда на базі мікропроцесорного контролера та їх дослідження" (ТОВ НВП "Бартон", м. Харків), за якими здобувач був відповідальним виконавцем.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розробка інформаційно-керуючої та контролюючої системи для оптимізації процесів керування рухомого складу приміського сполучення, його контролю та поліпшення умов роботи машиніста. Для досягнення мети поставлено ряд взаємозалежних задач:

1. Виконати аналіз сучасних систем керування тяговим рухомим складом приміського сполучення в Україні та у світі, сформулювати постановку задачі розробки ІККС одиниць рухомого складу.

2. Розробити і реалізувати ІККС для забезпечення збору, обробки і реєстрації даних, що зчитуються з вимірювальних датчиків, контролю стану об'єкта керування, формування керуючих впливів.

3. Розробити математичні моделі електромеханічних систем об'єктів керування для розв'язання задач оптимального керування рухом.

4. Розвинути та адаптувати метод термінальних керувань для розв'язання задачі оптимального керування рухом поїздів у реальному часі.

5. Розв'язати задачу оптимізації системи керування поїзду із тяговими двигунами постійного струму для зменшення енерговитрат.

6. Розробити систему контролю статичних і динамічних характеристик процесів, які протікають в елементах електромеханічних систем одиниць рухомого складу, як підсистему ІККС.

7. Розробити систему підтримки прийняття рішень машиністом, яка дозволить зменшити витрати енергоресурсів та поліпшити якість керування, як підсистему ІККС.

8. Підтвердити правильність запропонованих рішень за допомогою дослідження розроблених систем, методів й алгоритмів на моделях і реальних об'єктах.

*Об'єкт дослідження* – процеси керування тяговим рухомим складом приміського сполучення.

*Предмет дослідження* – інформаційне та математичне забезпечення оптимізації процесів керування та контролю тяговим рухомим складом приміського сполучення.

*Методи дослідження.* Теоретичні положення щодо побудови математичних моделей поїздів та їх систем керування і математичне моделювання застосовані під час удосконалювання існуючої системи керування приводом електропоїзду з тяговими двигунами постійного струму, уточнення параметрів систем автоматичного керування (САК) приводом з двигунами змінного і постійного струмів, дослідження об'єкта керування у цілому; теорія оптимального керування, методи теорії контролю та теорія нейронних мереж – під час розробки систем керування й контролю електро- і дизель-поїздів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У ході розв'язання поставлених задач отримані наступні наукові результати:

1. Вперше для новітніх дизель-поїздів, що виготовляються в Україні, запропонована структура ІККС та використовувані у ній методи обробки інформації, що дозволило оперативно здійснювати аналіз процесів, які протікають в елементах системи, формувати необхідні дані для вироблення керуючих сигналів, визначати керування у режимі реального часу з урахуванням заданого критерію якості, здійснювати оперативний контроль функціонування систем як у процесі налагодження, так й у процесі експлуатації.

2. Удосконалені математичні моделі електропоїзда, що дозволило оптимізувати існуючу систему керування, визначити конструктивні параметри компонентів САК електропоїзда, провести комплексні дослідження у замкнутій системі керування.

3. Дістав подальший розвиток метод термінальних керувань, що дозволило формувати оптимальний тяговий момент поїзду у реальному часі та мінімізувати енергетичні витрати.

4. Вперше запропоновано метод контролю на основі таксономічного показника для одиниць рухомого складу, що дозволило спростити виявлення розладнань у системі та здійснення оперативного контролю різнотипних та змінних у часі характеристик об'єкта керування.

5. Розвинуто методику прогнозування процесів боксування, яка дозволяє на відміну від відомих методик більш оперативно перешкоджати розвитку боксування шляхом формування відповідних сигналів для системи керування.

6. Дістала подальший розвиток система підтримки прийняття рішень машиністом, яка є складовою частиною ІККС та дозволяє зменшити витрати енергоресурсів і поліпшити якість керування.

**Практичне значення одержаних результатів у галузі автоматизації процесів керування:**

- запропонована й реалізована з використанням програмованого мікропроцесорного контролера ІККС, яка дозволила спростити налагодження системи керування, контроль технічного стану електроприводу одиниць приміського рухомого складу під час експлуатації;

- розроблена й реалізована на ПЕОМ математична модель електропоїзда із синтезованою системою керування, що дозволяє на стадії проектування замінити експериментальні дослідження моделюванням;

- за допомогою запропонованих алгоритмів синтезу керувань, методів контролю і моделей, розроблені структури та визначені параметри системи керування рухом поїзду та САК електропередачі, які забезпечують: зменшення енергетичних витрат на одиницю перевезеного вантажу; підвищення комфортних умов у процесі перевезення пасажирів; автоматизацію контролю протікання процесів у елементах електромеханічної системи поїздів.

Результати роботи впроваджені:

- ДП завод "Електроважмаш" (м. Харків) під час пусконалагоджувальних робіт уперше збудованого в Україні дизель-поїзда з асинхронним приводом, де застосована ІКСС, яка дозволила скоротити час настроювання системи керування, а також заощадити матеріальні та трудові ресурси;

- ВАТ НДІ "Перетворювач" (м. Запоріжжя) під час розробки систем керування електроприводом дизель-поїздів;

- у навчальному процесі НТУ "ХПІ" на кафедрі обчислювальної техніки та програмування під час проведення лабораторних робіт з курсу "Системний аналіз та комп'ютерне моделювання".

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведено синтез оптимізаційної моделі електромеханічної частини

електропоїзду з використанням адаптованого методу термінальних керувань і синтез САК поїзду [1, 10]; запропоновані алгоритми синтезу термінальних керувань рухом поїзду, розрахунку вектора-функції керування у режимі реального часу [2, 16]; запропонована структура ІККС і запропоновано засіб її реалізації, розроблені структури даних, математична модель системи керування [3, 11, 15]; запропоновані архітектура та алгоритми роботи нейронної мережі для адаптивного контролю динамічних характеристик дизель-поїзду [4, 5, 7]; запропонована нейронна мережа для контролю процесів боксування при розгоні поїзду [6]; отримані оптимальні керування розгоном поїзду за допомогою принципу максимуму [8, 13]; запропонована система контролю на основі таксономічного показника для дослідження різнотипних характеристик об'єкта керування в процесі експлуатації рухомого складу [9, 12, 15]; запропонована система підтримки прийняття рішень машиністом для ідентифікації режимів роботи електрообладнання [14].

**Апробація дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи були повідомлені й пройшли обговорення на міжнародній науково-практичній конференції "Наука і соціальні проблеми суспільства: людина, техніка, технологія, довкілля" (Харків, 2001 р.); 3, 4 і 7-й міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми інформатики та моделювання" (Харків, 2003, 2004 і 2007 р.); міжнародних науково-технічних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я" (Харків, 2002, 2004, 2006 і 2007 р.); 3-й міжнародній науково-технічній конференції "Інформаційна техніка та електромеханіка" (Луганськ, 2005 р.); міжнародній конференції з керування "Автоматика-2005" (Харків, 2005 р.).

**Публікації:** Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 16 наукових працях, серед них 10 – у фахових наукових виданнях ВАК України.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 228 сторінок, з них 30 ілюстрацій по тексту; 48 ілюстрацій на 25 стор.; 4 таблиці по тексту; 4 таблиці на 6 стор.; 5 додатків на 33 стор.; 138 найменувань використаних літературних джерел на 15 стор.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступній частині** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність, сформульовано мету та основні задачі досліджень, визначено методи розв'язання поставлених задач, сформульовано наукову новизну роботи та практичну цінність отриманих результатів. Наведені дані про впровадження результатів роботи, її апробацію та публікації.

**У першому розділі** проведено аналіз методів керування швидкістю руху приміських поїздів з тяговими електроприводами постійного та змінного стру-

мів з погляду вдосконалювання систем керування процесами розгону поїздів для забезпечення економії енергоносіїв. Показана важлива роль застосування інформаційних систем на залізничному транспорті, як засіб побудови єдиної ІККС для виконання функцій оптимального керування та сучасних методик контролю. Також наведений аналіз методів і критеріїв якості, використовуваних для синтезу САК швидкістю руху поїздів.

Визначено мету даної роботи й сформульований ряд завдань, які у ній розв'язуватимуться.

**В другому розділі** розглянуті електромеханічні схеми електропоїзду з двигунами постійного струму та дизель-поїзду з тяговими асинхронними двигунами, розглянуті питання розробки ІККС, математичних моделей об'єктів керування і методів для їх керування та контролю.

Для новітнього дизель-поїзду ДЕЛ-02 розроблена та впроваджена сучасна ІККС, яка здатна розв'язувати широке коло задач від збору, обробки та реєстрації даних до формування керуючих сигналів, контролю стану об'єкта керування у цілому, має гнучкі можливості з керування уставками та параметрами, модифікації структури системи, а також подальшому нарощуванню функціональності. ІККС має ієрархічну структуру, яка наведена на рис. 1, та складається з окремих блоків, що пов'язані між собою загальними задачами ведення поїзду, як об'єкта керування.

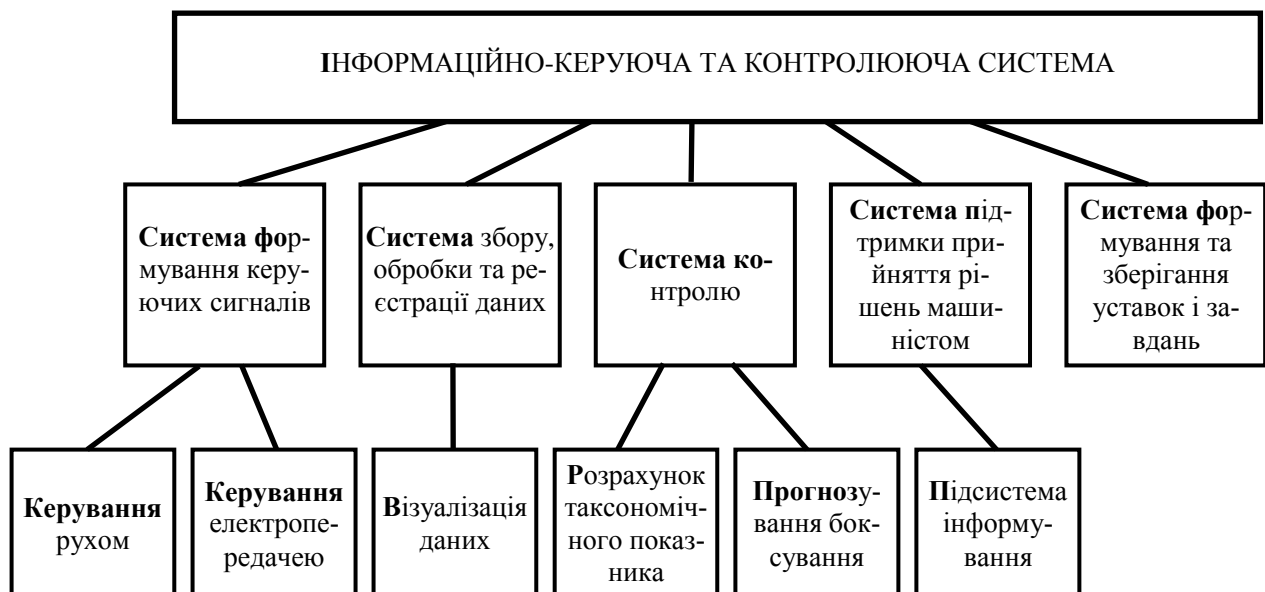


Рис. 1. Структура ІККС

Система формування керуючих сигналів згідно із завданням формує сигнали керування за методом двоетапної оптимізації: керування рухом (визначення тягового моменту для окремих ділянок шляху в залежності від завантаження поїзду, профілю залізничного шляху, розкладу руху) та керування електроприводом (реалізація тягового моменту відповідно до певного типу приводу).

Система збору, обробки та реєстрації даних (ЗОРД) виконує прийняття

поточних значень від датчиків і пристроїв САК, виконує обробку та фільтрацію сигналів, нормалізацію й перетворення у формат, відповідний до фізичних величин. Загалом вводиться 20 аналогових та 32 дискретних сигналів.

Підсистема візуалізації даних відображає у режимі реального часу поточні значення: сигналів з датчиків (діючі й активні струми двигунів, напруги генератора та ланки постійного струму, частоти обертання генератора і роторів двигунів, температури генератора та двигунів), сигналів керування (збудження генератора, глибина модуляції та частота перетворювачів частоти, частота ковзання, номер позиції контролера машиніста), статистичної інформації (час, швидкість обміну, кількість виявлених помилок при передаванні, кількість відправлених та отриманих пакетів даних), а також використовується для перегляду накопичених даних. Відображення значень змінних у реальному часі виконано у вигляді п'яти екранів: "Машиніст", "Швидкість", "Електропередача", "Двигун" та "Генератор". Разом з системою ЗОРД ця система являє собою потужний інструмент не тільки для керування та контролю електроприводу, але й для налаштування системи керування, створення нових систем контролю й діагностики, удосконалення існуючих систем.

Система контролю контролює функціонування енергетичних систем поїзду за сигналами, що знімаються з датчиків. При цьому формуються відповідні сигнали захисту. Крім цього, для виявлення розладнань у системі використовується розрахунок таксономічного показника, а для прогнозування процесів боксування розроблена штучна нейронна мережа.

Система підтримки прийняття рішень забезпечує підтримку машиністом оптимальних режимів керування поїздом шляхом аналізу поточних сигналів з датчиків, сигналів керування, сигналів завдань, а також поточного стану об'єкта керування у цілому. Результати аналізу відображаються за допомогою підсистеми інформування.

Система формування та зберігання уставок і завдань забезпечує можливість налаштування параметрів системи керування (різні коефіцієнти, постійні часу, пороги мінімальних і максимальних значень сигналів), завдання параметрів системи керування у різних режимах функціонування для можливості реалізації різних варіантів конфігурацій системи керування. Загальна кількість параметрів, що можуть бути змінені, складає 163.

Розробка кожної з підсистем виконана на основі методів сучасних комп'ютерних та інформаційних технологій, методів теорії оптимального керування, математичного моделювання й нейронних мереж.

Розроблена математична модель електропривода постійного струму з одним еквівалентним двигуном.

В пакеті моделювання неперервних систем розроблена структурна схема моделі, яка використовується для досліджень та уточнення параметрів схеми.



Реалізована з використанням пакета моделювання неперервних систем математична модель електропривода з тяговими асинхронними двигунами використовувалась у дослідженнях.

Адаптація методу термінальних керувань для синтезу системи керування рухом електро- чи дизель-поїзду необхідна для зменшення кількості розрахунків під час пошуку керувань, для можливості його застосування під час руху.

Як керування обрано тяговий момент  $M_T$ , що виражений як функція шляху  $S$  ( $c_0, c_1, c_2$  – постійні коефіцієнти):

$$M_T = \frac{1}{m R_K} \frac{d^2 S}{dt^2} + \left[ c_0 + c_1 \frac{dS}{dt} + c_2 \left( \frac{dS}{dt} \right)^2 \right] \frac{j m g R_K}{1000}. \quad (13)$$

Зміну шляху під час руху можна описати як функцію часу  $S(t) = C_1 + C_2 t + \dots + C_i t^{i-1}$ , тому тяговий момент також може бути описаний як функція часу. Кількість коефіцієнтів  $C_i$  можна обмежити кількістю відомих граничних значень (для шляху, швидкості та прискорення). Якщо позначити граничні умови по шляху, швидкості та прискоренню як  $S_0, S_1, V_0, V_1, G_0, G_1$  відповідно, то отримаємо систему із 6 лінійних рівнянь, з яких потрібно знайти 6 невідомих коефіцієнтів. Таким чином, є можливість виконувати розрахунок коефіцієнтів обмеженою кількістю операцій у реальному часі під час руху.

Для контролю статичних характеристик в електроприводі дизель-поїзду, з метою виявлення розладнань обрано таксономічний показник, який є інтегральною оцінкою, яка враховує багато різнотипних сигналів і параметрів. Таким чином, аналізуючи лише один сигнал, можна контролювати стан об'єкта. Розрахунок показника виконується за допомогою нейронних мереж.

Оскільки режими функціонування енергетичних ланок дизель-поїзда при різних позиціях контролера машиніста істотно відрізняються один від одного, то пропонується таксономічний показник розраховувати для кожної позиції контролера машиніста окремо, тобто використовувати векторний або багатокомпонентний таксономічний показник  $D = (d^1, \dots, d^{n_k})$ , де  $n_k$  – кількість позицій контролера машиніста. Окрім використання таксономічного показника для виявлення розладнань запропоновано використовувати таксономічний показник й для контролю динамічних процесів.

Для розв'язання задачі протидії боксуванню запропонована прогнозуюча нейронна мережа, яка дозволяє значною мірою вирішити проблему раннього виявлення процесів боксування і юза. Рішення ґрунтується на аналізі інформації, що міститься в послідовності значень вихідного сигналу об'єкта керування. Як вхідний сигнал для підсистеми прогнозування боксування в ІККС використовується різницевий сигнал обертання роторів двигунів. У запропонованому методі контролю і прогнозування процесів боксування колісних пар використо-

вується нейронна мережа, яка за зміною сигналу різницевого боксування дозволяє передбачити можливе виникнення і розвиток даних процесів.

Для навчання нейронної мережі використані вибірки, отримані в результаті аналізу великої кількості реальних процесів, які зареєстровані за допомогою ІККС.

**У третьому розділі** виконано синтез систем керування рухом і електроприводами електро- та дизель-поїздів приміського сполучення.

Задачею системи керування рухом є визначення зміни шляху  $S$  під час переведення об'єкта керування з початкового стану  $S(0)$  у кінцевий  $S(t_k)$  при дотриманні заданих обмежень і оптимізації критерію якості. Для розв'язання цієї задачі використовується метод термінальних керувань. Вхідними даними для знаходження термінальних керувань є система диференціальних рівнянь, що описує об'єкт керування, обмеження на фазові координати й функції від них, функціонал, який оптимізується, початкові й граничні умови відповідно на лівому і правому кінцях фазової траєкторії. Результатом розв'язання задачі є вектор-функція керування  $u$  ( $u_1, u_2, \dots, u_m$ ), яка мінімізує на відрізку часу  $[t_0, t_1]$  функціонал й забезпечує виконання накладених обмежень при дотриманні граничних умов.

Відповідно до прийнятих допущень, визначення тягового моменту в поточний момент часу обчислюється згідно зі співвідношенням

$$M_T = K_0 [ c_0 + m ( 2 C_2 + 6 C_3 t + 12 C_4 t^2 + 20 C_5 t^3 + 30 C_6 t^4 ) + \\ + c_1 ( C_1 + 2 C_2 t + 3 C_3 t^2 + 4 C_4 t^3 + 5 C_5 t^4 + 6 C_6 t^5 ) + \\ + c_2 ( C_1 + 2 C_2 t + 3 C_3 t^2 + 4 C_4 t^3 + 5 C_5 t^4 + 6 C_6 t^5 )^2 ], \quad (14)$$

де  $K_0$  – коефіцієнт пропорційності, що залежить від маси дизель-поїзда й заданої кінцевої швидкості;  $c_0, c_1, c_2$  – постійні коефіцієнти, які визначають опір руху поїзда;  $m$  – маса дизель-поїзда;  $C_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) – постійні коефіцієнти, що розраховуються;  $t$  – час від початку інтервалу керування.

Вибір "кращої" траєкторії здійснюється за ознакою мінімуму питомої витрати палива (витрата палива на одиницю пройденого шляху за фіксований час розгону до певної швидкості). Витрати палива під час руху дизель-поїзда за заданою ділянкою колії відповідно до певної припустимої фазової траєкторії визначаються функціоналом. Ознакою оптимальності є мінімум функціонала

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} g_e(P_e) P_e dt, \quad (15)$$

де  $[t_0, t_1]$  – відрізок часу;  $g_e$  – питома витратна характеристика дизеля;  $P_e = P_e(t)$  – повна споживана потужність енергетичною системою дизель-поїзду.

Показано, що розроблений алгоритм пошуку оптимальних керувань під час руху поїзда за заданою ділянкою колії, не критичний до довжини ділянки, а, отже, і часу проходження, оскільки є можливість дробити ділянки колії під час

розрахунку оптимальної траєкторії на окремі частини.

У процесі досліджень розглянуті різні варіанти, що мають місце в процесі розгону: різна маса дизель-поїзда; ділянки різної довжини з певними ухилами колії; розгін до різних кінцевих швидкостей за заданий час. Для кожного з варіантів розраховані коефіцієнти  $K_0$ ,  $C_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ). Отримано результати, які дозволяють зробити висновок, що коефіцієнти  $C_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) можуть визначатися тільки для випадку максимального завантаження дизель-поїзда, а для проміжних варіантів (неповного завантаження) вони залишаються незмінними. Забезпечення ж виконання граничних умов за швидкістю здійснюються певним значенням загального коефіцієнта підсилення  $K_0$ . Економія палива для можливих варіантів експлуатації (різні профіль колії й маса дизель-поїзда) у процесі розгону склала не менше 5,86%, що дає можливість судити про доцільність використання синтезованого закону керування. Апробація синтезованого закону керування здійснена на ПЕОМ у складі ІККС дизель-поїзда ДЕЛ-02.

Для електропоїзда розглянута задача вдосконалювання існуючої системи керування електроприводом з тяговими двигунами постійного струму, яка є підсистемою керування електропередачею (рис. 1). Для відомої структури (системи керування) знайдені оптимальні керування, які забезпечують переведення об'єкта з початкового фазового стану в кінцевий з урахуванням оптимізації енергетичних витрат.

Під час знаходження оптимальних керувань використана математична модель електропоїзда, що розроблена у розділі 2. Як керуючий елемент виступає реостатний опір додаткового резистора  $R_D$  і опір шунта  $R_{III}$ .

Задача розв'язується в 2 етапи: керування опором додаткового резистора  $R_D$  до режиму ослаблення поля й потім керування опором шунта  $R_{III}$ . Результати перевірки на математичній моделі наведені в розділі 4.

Існуюча система керування з багатосекційним додатковим резистором не дає можливості одержати найкращі результати оптимізації за рахунок втрат під час перемикання секцій додаткового й шунтуючого резисторів. Для перспективних поїздів розв'язана задача пошуку безперервних керувань, які можуть бути реалізовані за допомогою сучасних апаратних засобів. Для розв'язання задачі пошуку оптимального керування використовується математична модель і як критерій оптимальності обраний функціонал, який являє собою лінійну зважену комбінацію квадрата керування й часу розгону електропоїзда:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = a_{10} + a_{11} x_2 + a_{12} x_2 e^{\beta x_1} + a_{13} x_1 + a_{14} u = f_1(x_1, x_2, u); \\ \frac{dx_2}{dt} = a_{20} + a_{21} x_1 + a_{22} x_1 e^{\beta x_1} + a_{23} x_2 + a_{24} x_2^2 = f_2(x_1, x_2); \end{cases} \quad (16)$$

$$I = \int_0^{t_k} (k_1 + k_2 u^2) dt, \quad (17)$$

де  $x_1, x_2$  – фазові координати;  $a_{10} = U_{\Pi} / L_E$ ;  $a_{11} = -C_E \gamma / L_E$ ;  $a_{12} = -a_{11}$ ;  $a_{13} = -R_E / L_E$ ;  $a_{14} = -1 / L_E$ ;  $u = R_D x_1$  – керування  $U_{\gamma D}$  (напруга на додатковому резисторі);  $a_{20} = -\mu j g a_0 / (2 \pi R_K 1000)$ ;  $a_{21} = \mu^2 4 C_M \gamma / (2 \pi m R_K^2 1000)$ ;  $a_{22} = -a_{21}$ ;  $a_{23} = -j g a_1 3,6 / 1000$ ;  $a_{24} = -j g a_2 2 \pi 3,62 / (1000 \mu)$ ;  $t_k$  – час розгону електропоїзду;  $k_1, k_2$  – постійні коефіцієнти.

Керування знайдені за допомогою принципу максимуму. В результаті отримано рівняння:  $A_2 u^2 + A_1 u + A_0 = 0$ , де  $A_2 = k_2$ ;  $A_0 = -k_1$ ;

$$A_1 = \frac{2 k_2}{a_{14}} \left[ a_{10} + a_{11} x_2 + a_{12} x_2 e^{\beta x_1} + a_{13} x_1 - \frac{(a_{12} \beta x_2 e^{\beta x_1} + a_{13}) (a_{20} + a_{21} x_1 + a_{22} x_1 e^{\beta x_1} + a_{23} x_2 + a_{24} x_2^2)}{a_{21} + a_{22} e^{\beta x_1} + a_{22} \beta x_1 e^{\beta x_1}} \right]. \quad (18)$$

Для поточних значень фазових координат  $x_1, x_2$  визначається оптимальне керування  $u_1 = (-A_1 - \sqrt{A_1^2 - 4 A_0 A_2}) / 2 A_2$  за умови, якщо значення керування  $u_1$  належить області припустимих керувань  $D$ . Інакше, для пошуку керувань необхідно використовувати вираз з урахуванням граничних значень керувань.

Оскільки в розглянутій задачі область припустимих керувань задається у вигляді інтервалу  $[0 \leq u \leq U_{\max}]$ , а за фізикою керованого об'єкта не може бути миттєвих перемикачів керування з нижнього граничного значення на верхнє й навпаки, то нескладно одержати вираз для визначення оптимального керування з урахуванням заданої області обмежень на керування:

$$u = \begin{cases} 0, & \text{якщо } u_1 \leq 0; \\ u_1, & \text{якщо } 0 \leq u_1 \leq U_{\max}; \\ U_{\max}, & \text{якщо } u_1 \geq U_{\max}. \end{cases} \quad (19)$$

Дослідження об'єкта керування з визначеним регулятором здійснено з використанням математичного моделювання, що підтвердило його працездатність і дозволило одержати більш економічні режими розгону електропоїзда, ніж при законі керування пускового резистора в існуючій системі. Результати дослідження наведені в розділі 4.

**У четвертому розділі** наведено результати досліджень можливостей ІККС, які проведені на дизель-поїзді, і дослідження електропоїзда на комп'ютерних моделях.

При дослідженні можливостей контролю об'єкта керування за допомогою таксономічного показника були отримані результати, які підтверджують правильність роботи підсистеми його розрахунку.

Таким чином, використання таксономічного показника в процесі руху забезпечує підвищення оперативності роботи та якості керування машиніста пої-

зда, оскільки аналіз функціонування визначається не множиною змінних, які спостерігаються на екрані дисплея, а по одній узагальнюючій змінній.

Система підтримки прийняття рішень машиністом є складовою частиною ІККС і функціонує на її основі. Зображення отримані в результаті обробки експериментальних досліджень, проведених на дизель-поїзді. У процесі розгону поїзда на зони сигналів накладається темним кольором траєкторія зміни поточних сигналів. Спочатку проводився прискорений режим розгону, а потім поточні значення відповідних сигналів переважно перебували в зонах номінального розгону.

За допомогою ІККС отримані зображення для зон основних стратегій керування розгоном дизель-поїзда, що передбачають мінімізацію енергетичних витрат у діапазоні швидкостей до 20, 30, ..., 90 км/год. Побудована в такий спосіб система підтримки прийняття рішень машиністом, як складова частина ІККС, дозволяє здійснювати більше ефективне керування за рахунок наочного інформування машиніста про поточний режим розгону.

Проведені дослідження електропоїзда з тяговими двигунами постійного струму в замкнутій системі регулювання дозволили уточнити параметри системи керування заданої структури у всьому робочому діапазоні швидкостей і навантажень і визначити пороги спрацьовування ключових елементів системи керування залежно від ступеня завантаження вагонів пасажирями з урахуванням оптимізації енергетичних витрат.

Аналіз результатів досліджень показує, що, з одного боку, пороги спрацьовування впливають на економію енергії, а, з іншого, – вони не повинні перевищувати гранично-припустимого значення (500 А).

З урахуванням перехідних процесів визначені такі пороги спрацьовування для досягнення заданої швидкості в 90 км/год:  $I_{\Pi} = 275$  (А) – для 50% завантаження місць для сидіння;  $I_{\Pi} = 325$  (А) – для 100% завантаження місць для сидіння;  $I_{\Pi} = 375$  (А) – гранично-припустиме завантаження вагонів пасажирями.

Аналіз результатів досліджень систем керування на моделях показав, що математичне моделювання адекватно відбиває процеси, що відбуваються в об'єкті керування, а розроблені системи керування забезпечують мінімізацію паливно-енергетичних ресурсів на рівні (4 - 6)%.

**У додатках наведені:** опис електропоїзду як об'єкта керування й основних його технічних характеристик; зображення екранів ІККС "Машиніст", "Електропередача", "Швидкість" та "Двигун"; документи, що підтверджують практичне значення і впровадження результатів дисертаційної роботи; реалізація математичної моделі з використанням пакетів моделювання неперервних систем; матриці спостережень та стандартизовані матриці спостережень для 6-ї та 7-ї позиції контролера машиніста.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана науково-практична задача створення сучасної ІККС для рухомого складу приміського сполучення, яка підвищує його техніко-економічні показники, знижує енерговитрати, удосконалює процеси керування й поліпшує умови роботи машиніста. Отримані наступні основні результати:

1. На підставі проведеного аналізу сучасних систем керування тяговим рухомим складом приміського сполучення в Україні та у світі визначена важлива роль інформаційно-керуючих систем і сформульована задача її розробки.

2. Вперше в Україні з метою автоматизації процесів збору, реєстрації й обробки даних, скорочення строків пусконаладжувальних робіт розроблена бортова ІККС на основі персонального комп'ютера, яка є складовою частиною мікропроцесорного комплексного пристрою автоматики та дозволяє контролювати стан об'єкта керування, формувати керуючі сигнали, поліпшувати умови роботи машиніста.

3. Розроблені математичні моделі електромеханічних систем об'єктів керування, які дали змогу розробити та відлагодити ІККС, визначити параметри елементів САК об'єктів керування, провести дослідження під час розв'язання задач оптимального керування у замкнутій системі.

4. Запропоновано метод синтезу термінальних керувань рухом поїзда з урахуванням формування керуючих сигналів у режимі реального часу й забезпечення певного критерію якості в процесі руху поїзда на заданій ділянці залізничної колії в залежності від рівня його завантаження.

5. Розв'язана задача оптимізації системи керування поїзду з тяговими двигунами постійного струму, яка дала змогу оптимізувати роботу існуючої схеми за енергетичними витратами.

6. Запропоновано метод оцінки функціонування енергетичних систем дизель-поїздів й процесів, що протікають в елементах системи та визначення стану об'єкта керування з урахуванням режимів функціонування за допомогою багатокомпонентного таксономічного показника на основі нейронної мережі для обмеженої кількості позицій контролера машиніста. Розроблена нейронна мережа прогнозування процесів боксування.

7. Запропонована система підтримки прийняття рішень машиністом, яка дозволяє, відповідно до заданого режиму руху, виконувати оптимальне керування поїздом.

8. Проведені дослідження на моделях та реальних об'єктах, які підтвердили правильність прийнятих рішень і застосованих методик.

9. Розроблена ІККС впроваджена на ДП завод "Електроважмаш", ВАТ НДІ "Перетворювач" та дозволила скоротити час настроювання системи керування перших українських дизель-поїздів з асинхронним приводом. Розроблені

математичні та машинні моделі впроваджені у навчальному процесі на кафедрі обчислювальної техніки та програмування НТУ "ХПІ".

### Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Носков В.И. Оптимизационная модель для синтеза терминальных управлений движением электропоезда / В.И. Носков, Н.И. Заполовский, Ю.Н. Колыбин, М.В. Липчанский // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2001. – № 4. – С. 198–202.

*Здобувачем розроблена оптимізаційна модель електромеханічної частини електропоїзду.*

2. Липчанский М.В. Синтез терминальных управлений электроприводом электропоезда / М.В. Липчанский // Системи обробки інформації. – 2001. – Вип. 6 (16). – С. 79–83.

3. Даниленко А.Ф. Информационная система дизель-поезда ДЭП-01 / А.Ф. Даниленко, М.В. Липчанский, В.И. Носков, Г.И. Яровой // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2002. – № 9, т.7. – С. 57–60.

*Здобувачем розроблена структура інформаційної системи дизель-поїзду, запропоновані структури даних та алгоритми.*

4. Дмитриенко В.Д. Адаптивный контроль отклонений в системах управления локомотивов с помощью нейронных сетей / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, В.И. Носков, М.В. Липчанский // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2002. – № 18. – С. 45–51.

*Здобувачем розроблені архітектура та алгоритми роботи нейронної мережі визначення таксономічного показника.*

5. Дмитриенко В.Д. Обнаружение разладок в системах управления тягового подвижного состава с помощью искусственных нейронных сетей / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, В.И. Носков, М.В. Липчанский // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2003. – № 26. – С. 13–24.

*Здобувачем розроблені архітектури нейронних мереж.*

6. Дмитриенко В.Д. Проблемы оптимизации управления тяговым асинхронным приводом украинских дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, В.И. Носков, М.В. Липчанский // Моделювання та інформаційні технології. – 2004. – Вип. 26. – С. 48–54.

*Здобувачем запропонована нейронна мережа контролю процесів боксування при розгоні поїзду.*

7. Дмитриенко В.Д. Контроль тягового подвижного состава с использованием таксономического показателя / В.Д. Дмитриенко, В.И. Носков, М.В. Липчанский // Системи обробки інформації. – 2004. – Вип. 8 (36). – С. 20–26.

*Здобувачем запропонована структура нейронної мережі для контролю динамічних процесів.*

8. Дмитриенко В.Д. Математическое моделирование и оптимизация системы управления тяговым электроприводом / В.Д. Дмитриенко, В.И. Носков, М.В. Липчанский // Системи обробки інформації. – 2004. – Вип. 11 (39). – С. 55–62.

*Здобувачем отримані оптимальні керування з використанням принципу максимуму для САК електропривода.*

9. Дмитриенко В.Д. Контроль энергетических цепей дизель-поезда с использованием нейронных сетей / В.Д. Дмитриенко, М.В. Липчанский // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2006. – №40. – С. 58–64.

*Здобувачем запропонована система контролю для визначення таксономічного показника в процесі експлуатації рухомого складу.*

10. Заполовский Н.И. Синтез терминальных управлений движением поезда / Н.И. Заполовский, М.В. Липчанский, Н.А. Пинчук // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2007. – № 19. – С. 82–88.

*Здобувачем адаптовано метод термінальних керувань для розв'язання задачі оптимального керування розгоном дизель-поїзду.*

11. Липчанский М.В. Математическая модель комплексного устройства автоматики / М.В. Липчанский // Проблемы информатики и моделирования : 4-я междунар. науч.-техн. конф., 25-27 ноября 2004 г. : тезисы докл. – Харьков, 2004. – С. 20.

12. Дмитриенко В.Д. Проблемы контроля и оценки эффективности функционирования сложных объектов управления / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, М.В. Липчанский // Инфотелекоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании : 1-я междунар. науч.-техн. конф., 19 декабря 2004 г. – Ставрополь, 2004. – С. 251–255.

*Здобувачем запропоновано використання таксономічного показника в перехідних режимах роботи об'єкта.*

13. Носков В.И. Оптимизация динамических режимов работы тягового электропривода постоянного тока / В.И. Носков, М.В. Липчанский // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2005. – №1 (10). – С. 65–70.

*Здобувачем отримані оптимальні керування розгоном поїзду за допомогою принципу максимуму.*

14. Носков В.И. Интеллектуальная система для поддержки принятия решений машинистом дизель-поезда / В.И. Носков, В.Д. Дмитриенко, М.В. Липчанский, А.Ю. Заковоротный // Автоматика – 2005 : 12-а міжнар. конф. з автоматичного управління, 30 травня - 3 червня 2005 г. : тези доп. – Харків, 2005. –



Т.1. – С. 185.

*Здобувачем розроблена система ідентифікації режимів роботи електрообладнання.*

15. Заполовский Н.И. Оптимизация процессов энергетической системы объекта управления, их контроль и диагностика / Н.И. Заполовский, М.В. Липчанский // Проблемы информатики и моделирования : 6-я междунар. науч.-техн. конф., 23 - 25 ноября 2006 г. : тезисы докл. – Харьков, 2006. – С. 4.

*Здобувачем розглянуті питання побудови структури ІККС, розрахунку таксономічного показника за допомогою нейронних мереж.*

16. Заполовский Н.И. Разработка алгоритма и программы определения управлений движением дизель-поезда в масштабе реального времени / Н.И. Заполовский, М.В. Липчанский, Н.А. Пинчук // Проблемы информатики и моделирования : 7-я междунар. науч.-техн. конф., 29 ноября - 1 декабря 2007 г. : тезисы докл. – Харьков, 2007. – С. 19.

*Здобувачем запропоновано алгоритм формування термінальних керувань у реальному часі.*

## АНОТАЦІЇ

**Ліпчанський М.В. Моделювання, оптимізація та контроль систем керування рухомого складу приміського сполучення.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". Харків. – 2008.

Дисертація присвячена питанням розробки й дослідження інформаційно-керуючої та контролюючої системи, оптимізації процесів керування електроприводами поїздів приміського сполучення. Запропонована структура системи та її окремих блоків, розроблені математичні моделі електромеханічних систем дизель- та електропоїздів, за допомогою яких знайдені оптимальні керування рухом поїздів, та керування роботою енергетичним обладнанням. Розроблені системи контролю на основі таксономічного показника для виявлення розладнань та контролю динамічних характеристик, запропонована нейронна мережа прогнозування процесів боксування. Розроблена система підтримки прийняття рішень машиністом для економії енергоресурсів.

**Ключові слова:** система керування рухомого складу приміського сполучення, математична модель електромеханічної системи, прогнозуюча нейронна мережа, система підтримки прийняття рішень машиністом.

**Липчанский М.В. Моделирование, оптимизация и контроль систем управления подвижного состава пригородного сообщения.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт". Харьков. – 2008.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической задачи разработки информационно-управляющей и контролирующей системы (ИУКС), оптимизации процессов управления электроприводами поездов пригородного сообщения, а также контролю этих систем.

Обоснована актуальность разработки ИУКС для железнодорожного транспорта. Предложена иерархическая структура ИУКС, состоящая из основных систем: система формирования управляющих воздействий; система сбора, обработки и регистрации данных; система контроля; система поддержки принятия решений машинистом; система формирования и хранения уставок и заданий. Для каждой системы поставлены задачи и определены методы их решения. Разработана ИУКС, решающая широкий круг задач от сбора, обработки и регистрации данных до формирования управляющих сигналов и контроля состояния объекта управления в целом. В системе реализована возможность дальнейшего наращивания функциональности.

Рассмотрены методы управления скоростью пригородных поездов с тяговыми приводами постоянного и переменного токов с целью усовершенствования систем управления процессами разгона для экономии энергоресурсов. Предложены математические модели объектов управления с приводами постоянного и переменного токов для решения задач разработки и отладки ИУКС, определения и уточнения параметров систем управления, поиска и исследований оптимальных управлений.

При решении задач оптимизации рассмотрены различные критерии оценки качества функционирования систем. Адаптирован метод терминальных управлений движением поезда, который позволил рассчитывать управления во время движения с учетом различных характеристик (загруженности поезда, профиля железнодорожного пути, графика движения). Критерием оптимальности для дизель-поезда являлся расход топлива на единицу пройденного пути. Разработана модель, реализующая алгоритм поиска оптимальных управлений, который не критичен к длине участка и времени движения.

Задача оптимизации управлений дополнительным резистором в электроприводе постоянного тока при разгоне решена с использованием принципа максимума.

Разработаны системы контроля на основе современных информационных технологий. Для определения разладок в системе управления, а также для контроля динамических характеристик во время движения поезда использован векторный таксономический показатель, реализованный с помощью нейронной сети. Это позволяет контролировать объект управления, анализируя всего один сигнал, при этом учитывая множество разнотипных сигналов и параметров.

При решении задачи контроля боксования предложена прогнозирующая нейронная сеть для раннего обнаружения процессов боксования и юза, позволяющая предупредить развитие этих процессов. Для обучения нейронной сети использованы выборки, полученные в результате поездных испытаний.

Разработана система поддержки принятия решений машинистом, которая на основании анализа различных сигналов обеспечивает оптимальное управление объектом, что позволяет снизить расход энергоресурсов. Исходные данные получены при помощи ИУКС.

При исследованиях оптимальных управлений на компьютерных моделях рассмотрены варианты с различными параметрами движения и характеристиками поездов. Приведены результаты экспериментальных исследований ИУКС на дизель-поезде ДЭЛ-02, которые подтвердили адекватность моделей и правильность принятых теоретических решений.

**Ключевые слова:** система управления подвижным составом пригородного сообщения, математическая модель электромеханической системы, прогнозирующая нейронная сеть, система поддержки принятия решений машинистом.

**Lipchanskiy M.V. Design, optimization and control of control system local trains.** – Manuscript.

Thesis for the Ph.D. (candidate of science) degree, specialization 05.13.07 – automation of management processes. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Kharkiv. – 2008.

The dissertation is related to area of research, design and optimization of local train electric drive control systems. The structure of the hall system and included units was proposed. The mathematic models of electromechanical systems such diesel engines was designed. It was allowed to find out optimal controls for train moving modes and power-plant. The control system was used a taxonomical parameter, what was allowed to detect departure and dynamic parameters controlling. The neural network was proposed for predicting of blocking or skid processes. The decision-making system was designed to help a machinist to save electricity and energy.

**Keywords:** control system of local train, mathematical model of electromechanical system, predicting neural network, system for support making decision by machinist.

Підписано до друку 23.09.2008 р. Формат 60x90/16.  
Папір офсетний. Друк – ризографія. Умовн. друк. арк.0,9.  
Наклад 100 прим. Зам. № 262695

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.  
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001р.  
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16