

ВІДГУК

**офіційного опонента на дисертаційну роботу
Заковоротного Олександра Юрійовича
на тему «Синтез автоматизованої системи управління рухомим складом на ос-
нові геометричної теорії керування та нейронних мереж», що подана на здобут-
тя наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування**

Актуальність обраної теми. Унікальний для України вітчизняний дизель-поїзд серії ДЕЛ-02 має тяговий асинхронний електропривод – перший для тягового рухомого складу Укрзалізниці. Ці дизель-поїзди обладнані бортовою комп'ютерною інформаційно-вимірювальною системою, яка відкрила можливості для впровадження на її основі перших вітчизняних систем підтримки прийняття рішень машиністом. Впровадження цих систем дозволить без істотних фінансових витрат на їх розробку раціонально використовувати наявні паливно-енергетичні ресурси Укрзалізниці. Для створення подібних систем необхідна розробка математичних моделей, що описують об'єкт керування як багатомасову систему та дозволяють синтезувати закони керування, які враховують основні види коливань вагонів, сили, що виникають при їх взаємодії під час руху, буксування та паралельну роботу тягових асинхронних двигунів.

Сучасна геометрична теорія керування є одним із методів синтезу законів оптимального керування рухомим складом, яка дозволяє синтезувати закони керування для складних нелінійних об'єктів в режимі реального часу. Однак трудомісткі аналітичні обчислення геометричної теорії керування та труднощі визначення перетворень, що пов'язують змінні лінійних і нелінійних моделей, ускладнюють застосування геометричної теорії керування для пошуку оптимальних керувань рухомим складом в режимі реального часу. Тому доцільним є розробка спеціалізованого програмного забезпечення, що розширює область застосування геометричної теорії керування за рахунок автоматизації трудомістких обчислень та пошуку функцій перетворення на основі методів й технологій нейронних мереж. Створення подібного програмного забезпечення дозволить використати його як складову системи підтримки прийняття рішень машиністом, яка на основі баз даних та знань видає машиністу оптимальні, з точки зору витрат енергії, закони керування рухомим складом, що враховують комфортні умови для пасажирів.

Тому тема дисертаційної роботи, яка присвячена синтезу системи підтримки прийняття рішень машиністом, яка створює теоретичну передумову розробки автоматичних систем керування швидкісним рухомим складом і дозволяє поліпшити його енергетичні характеристики, є актуальною науково-прикладною проблемою, яка визначила напрям досліджень дисертаційної роботи.

Актуальність та перспективність дисертаційної роботи підтверджується і тим, що наукові дослідження проводилися в рамках плану науково-дослідних робіт МОН України в рамках держбюджетних тем «Розвиток теорії стабільно-пластичних нейронних мереж для розв'язання задач класифікації, оптимізації та керування динамічними об'єктами» (ДР № 0110U001247), «Розробка інтелектуальних СППР для діагностики, керування та оптимізації технічних та біотехнічних об'єктів»

(ДР № 0113U000449), «Розвиток теорії нейронних мереж адаптивного резонансу та асоціативної пам'яті для створення інтелектуальних систем» (ДР № 0116U000893) та госпдоговорів з Укрзалізницею та її підрозділами: «Впровадження діагностичного комплексу для проведення інформаційно-вимірювальної діагностики електронної системи управління дизель-поїздів серії ДЕЛ-02 № 001, № 002, № 003, № 004» (Одеська залізниця, м. Одеса), «Розробка та впровадження програмного забезпечення для визначення економічного ведення дизель-поїздів серії ДЕЛ-02 № 001, № 002, № 003, № 004» (Одеська залізниця, м. Одеса, м. Христинівка), «Проведення досліджень системи охолодження ТЕД тепловозів 2ТЕ116. Розробка заходів щодо мінімізації енерговитрат на допоміжні потреби тепловоза 2ТЕ116» (Укрзалізниця, м. Київ), у яких здобувач був відповідальним виконавцем.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Заковоротного Олександра Юрійовича є високою й базується на аналізі літературних джерел за даною проблемою, гармонійній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження, зіставленні і критичному аналізі отриманих результатів у порівнянні з результатами інших дослідників, і якісному формулюванні отриманих висновків. Теоретичні дослідження виконано з використанням фундаментальних положень теорії тяги поїздів та тягового електроприводу; сучасного математичного апарату методів геометричної теорії керування; методів теорії програмування; методів математичного моделювання; методів штучного інтелекту та нейронних мереж.

Отримані результати перевірені шляхом критичних переходів одержаних формул до відомих раніше результатів, що підтверджує обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі результатів дослідження.

Достовірність результатів досліджень. Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, застосуванням стандартних процедур математичного аналізу й методів керування, відповідністю змісту математичних моделей фізичній суті описуваних об'єктів. Отримані результати, висновки і рекомендації логічно і математично аргументовані. Достовірність забезпечується коректною математичною постановкою проблеми синтезу автоматичних систем керування швидкісним рухомих складом для поліпшення його енергетичних характеристик.

Усі методи, що запропоновані в дисертаційній роботі обґрунтовані строгими математичними викладками і підтверджуються результатами чисельних експериментів на ЕОМ та на реальному дизель-поїзді.

Достовірність результатів дисертаційної роботи підтверджується задовільним співпаданням даних, які отримані шляхом експериментальних досліджень розроблених методів та алгоритмів на математичних моделях і реальному об'єкті.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

– одержала подальший розвиток математична модель руху дизель-поїзда, що, на відміну від існуючих моделей, які описують повздовжні коливання вагонів або один еквівалентний тяговий привід, враховує повздовжні коливання, бічне відхилення та вилання вагонів рухомого складу та розподіл сил взаємодії між ними, буксування та паралельну роботу двигунів обмоторених вагонів. Це дозволяє точніше

описати реальні процеси, які відбуваються у дизель-поїзді, провести дослідження впливу коливань вагонів на процес руху та витрати енергії рухомого складу;

– вперше розроблено метод, який дозволяє автоматизувати аналітичні перетворення геометричної теорії керування при синтезі лінійних моделей у формі Бруновського та здійснювати пошук функції переходу між змінними нелінійної і лінійної моделей об'єкта керування, що розширює область застосування геометричної теорії керування з об'єктів, які описуються 5-6 диференціальними рівняннями на об'єкти, котрі описуються системами звичайних диференціальних рівнянь, що містять десятки рівнянь;

– вперше запропоновано застосовувати геометричну теорію керування для автоматизації процесів управління як двоетапний метод, в якому на першому етапі здійснюється пошук оптимальних керувань на рівні каналів керування, а на другому – на рівні всього об'єкта, що дозволило обґрунтувати можливість ведення рухомого складу за допомогою одного обмотореного вагону та економити до 7–9 % паливно-енергетичних ресурсів;

– вперше розроблені N -направлена та багат шарові асоціативні пам'яті, котрі, на відміну від існуючих мереж двонаправленої асоціативної пам'яті, здатної зберігати лише пари асоціативних зображень, дозволяють відновлювати за вхідною інформацією множину з N асоціативних зображень та ланцюжки асоціацій, що дозволило використати їх в базі даних системи підтримки прийняття рішень машиністом для зберігання всіх маршрутів руху дизель-поїзда та законів керування рухомим складом для всіх перегонів відповідних маршрутів;

– вперше розроблені стабільно-пластичні нейронні мережі Хеммінга, Хебба і мережі на основі перцептрона, котрі, на відміну від їх класичних аналогів, здатні розпізнавати нову інформацію та донавчатися, що дозволяє розширити область застосування цих нейронних мереж в системі підтримки прийняття рішень машиністом для автоматизації процесів керування;

– одержали подальший розвиток архітектури й алгоритми функціонування мереж Хеммінга та безперервних нейронних мереж адаптивної резонансної теорії, котрі, на відміну від існуючих мереж, можуть обирати та відновлювати зі своєї пам'яті декілька рівноцінних рішень, що дозволяє здійснювати пошук функцій перетворення, які зв'язують лінійну і нелінійну математичні моделі руху рухомого складу;

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання полягає у розроблених інженерних методиках синтезу автоматизованої системи управління рухомим складом:

– створено програмне забезпечення, що дозволяє автоматизувати аналітичні перетворення геометричної теорії керування при синтезі лінійних моделей у формі Бруновського, обчислювати функції переходу між змінними нелінійної і лінійної моделей, синтезувати оптимальні закони керування тяговим рухомим складом та моделювати складові бортової системи підтримки прийняття рішень машиністом;

– реалізовано: модель руху колісної пари вагону, що дозволяє досліджувати основні види коливань вагонів й пружні зв'язки колісної пари з візком вагону; модель паралельної роботи двигунів обмотореного вагону, що дозволяє досліджувати їх роботу під час руху дизель-поїзда в режимі тяги та в режимі переходу від тяги до буксування; нелінійну та лінійну моделі руху дизель-поїзда, що дозволили точніше описати об'єкт керування, провести дослідження щодо впливу основних видів коли-

вань вагонів на процес руху та витрати енергії поїзда, а також протестувати закони керування;

– створено програмне забезпечення, що реалізує складові бортової системи підтримки прийняття рішень машиністом: нейромережеві бази даних та знань, систему діагностики й систему прогнозування та боротьби з буксуванням, що дозволяє використовувати його у реальних умовах експлуатації дизель-поїзда;

– створено програмне забезпечення, що реалізує розроблені нейронні мережі, здатні розпізнавати нову інформацію, донавчатися в процесі функціонування та визначати декілька рівноцінних рішень, що дозволяє виконати перевірку працездатності алгоритмів функціонування запропонованих нейромереж та створювати на їх основі нові системи підтримки прийняття рішень машиністом, які можуть донавчатися й визначати декілька рішень.

Основні результати виконаних в дисертації досліджень та практичних розробок використані на промислових підприємствах і організаціях, що займаються проектуванням, виробництвом та експлуатацією дизель-поїздів, зокрема

– службою приміських пасажирських перевезень Одеської залізниці при вдосконаленні системи керування, контролю та діагностики дизель-поїздів серії ДЕЛ-02 з електроприводами змінного струму, що дозволило підвищити ефективність експлуатації дизель-поїздів;

– ПАТ завод «Перетворювач» (м. Запоріжжя) при створенні систем керування, діагностики та контролю електроприводів;

– ДП «Пасажирське вагонне депо Харків-Сортувальний» при визначенні оптимальних графіків руху рухомого складу;

Матеріали дисертації використовуються у навчальному процесі:

– Інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту (м. Харків) при підготовці магістрів та спеціалістів за спеціальністю «Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного транспорту»;

– НТУ «ХП» на кафедрі обчислювальної техніки та програмування при викладанні навчальних дисциплін «Основи нейрокомп'ютерингу» та «Бортові системи керування», а також у курсових і дипломних роботах студентів за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія».

Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях та апробація роботи. Результати дисертаційної роботи досить повно відображені у 67 наукових публікаціях, з них: 1 монографія (у співавторстві), 20 статей у наукових фахових виданнях України (19 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 16 статей у закордонних періодичних фахових виданнях, 9 патентів України (4 – на винахід, 5 – на корисну модель); 2 свідоцтва України про реєстрацію авторського права на програмний код; 19 – у матеріалах конференцій.

Основні результати роботи доповідались та обговорювались на: Міжнародних науково-технічних конференціях та конкурсах: «Перспективні комп'ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України» (Алушта, 2010); «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту» (Херсон–Євпаторія, 2011, 2012); «Проблеми інформатики і моделювання» (Ялта, 2011); «Комп'ютерні науки та технології» (Белгород, 2011); «Системний

аналіз та інформаційні технології» (Київ, 2011, 2014, 2016); «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2012, 2016); «Прикладна математика, управління та інформатика» (Белгород, 2012); «Інформаційні технології, економіка і право: стан і перспективи розвитку» (Чернівці, 2013); «Освіта, наука, транспорт в ХХІ столітті: досвід, перспективи, інновації» (Самара–Оренбург, 2014, 2015); «Автоматика» (Одеса, 2015, Суми, 2016); «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі» (Кривий Ріг, 2016); «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (Одеса–Хмельницький, 2016); «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (Київ, 2016), конкурсі «Найкращий молодий науковець НТУ «ХП», переможець конкурсу (Харків, 2013, 2014, 2016); 16-му обласному конкурсі «Вища школа Харківщини – кращі імена», переможець в номінації «Молодий науковець» (Харків, 2014).

Зв'язок докторської дисертації з кандидатською. Положення, наукові результати та висновки, що виносились на захист кандидатської дисертації, не виносяться на захист докторської дисертації

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. Керуючими впливами у роботі прийнятні (2.19) – (2.31) проєкції на вісі α і β напруги на обмотках статорів двигунів $U_{\alpha}^q, U_{\beta}^q$ ($q = \overline{1, 3}$). Але машиніст дизель-поїзду керує положенням контролера. Тому рівняння (2.19) – (2.31) доцільно доповнити рівняннями динаміки роботи: всережимного регулятора швидкості колінчастого валу дизеля, за допомогою якого керується подача палива дизеля, електричного генератора, який керується по колу збудження, перетворювачів частоти, за допомогою яких формуються частоти та напруги на статорних обмотках асинхронних двигунів.

2. При синтезі системи оптимального керування дизель – потягом не урахована нелінійна характеристика розходу палива дизеля при його роботі на різних характеристиках частинного навантажування. Синтез системи, за допомогою якої забезпечується робота дизеля на характеристиці мінімального питомого розходу палива дає можливість додаткової економії пального.

3. Сучасні системи керування двигунами змінного струму – як асинхронними, такі синхронними, мають контур прямого керування моментом (Direct Torque Control – DTC) двигуна, при якому час наростання моменту двигуна складає близько 5 мс, а час зменшення моменту і взагалі складає 50 мкс. При такій швидкодії контуру прямого керування моментом двигуна можна нехтувати електромагнітними перехідними процесами у колах ротора і статора двигуна, які описуються рівняннями (1.2) – (1.6) порівняно із механічними перехідними процесами між вагонами, які описуються рівняннями (1.10) і обумовлені наявністю пружних елементів між вагонами і виникненням прокольних коливань вагонів дизель-потяга. Це ж стосується і системи рівнянь (2.19) – (2.32).

4. Нелінійність вихідної системи (2.19) – (2.31) обумовлена наявністю членів у вигляді добутку проєкцій потокозчеплень $\Psi_{\alpha 2}^q, \Psi_{\beta 2}^q$ ($q = \overline{1, 3}$), а керуючими впливами такої системи є проєкції на вісі α і β напруги на обмотках статорів двигунів $U_{\alpha}^q, U_{\beta}^q$ ($q = \overline{1, 3}$). При використанні контурів прямого керування моментами (Direct Torque

Control – DTC) двигунів, керуючим впливом для кожного двигуна є завдання по моменту двигуна так, що вихідна система (2.19) – (2.31) стає лінійною.

5. Не зрозуміло, яким чином за допомогою системи рівнянь (2.18) можна моделювати явище буксування колісних пар без завдання характеристики тертя колісної пари і рельсу, тим більше, що явище буксування може виникати і не тільки при великих швидкостях руху дизель-потяга, а і при страгуванні нерухомого дизель-потяга з великою рушійною силою, яка перевищує силу тертя.

6. У режимі руху, коли буксування немає, швидкості руху вагонів V_1, V_2, V_3 дизель-потяга і кутові швидкості обертання роторів двигунів ω^q ($q = \overline{1,3}$) – зв'язані статичною залежністю (без урахування пружних елементів) і при цьому порядок системи диференціальних рівнянь (2.19) – (2.31) зменшується, а у режимі буксування ці швидкості різні. При чому, перехід у режим буксування настає у той час, коли рушійна сила перевищує силу тертя. Не зрозуміло, як ці умови буксування та ще і нелінійну залежність тертя ураховує модель (2.19) – (2.31).

7. Метою роботи є «... розробка системи підтримки прийняття рішень машиністом для автоматизованої системи управління дизель-поїзда» а темою роботи є «Синтез автоматизованої системи управління рухомим складом».

8. Розробка алгоритмічного та програмного забезпечення, яке дозволяє автоматизувати аналітичні перетворення геометричної теорії керування при синтезі лінійних моделей у формі Бруновського, не є науковою новизною, а є лише практичною реалізацією розробленого математичного забезпечення методу перетворення геометричної теорії керування при синтезі лінійних моделей у формі Бруновського. Розвиток бази знань системи підтримки прийняття рішень машиністом та розвиток бортової системи підтримки прийняття рішень машиністом також не є науковою новизною, а є лише практичною реалізацією розробленого методу.

9. Доцільно було б проаналізувати відхилення реальних та модельних залежностей швидкостей руху дизель-потяга, які показані на рис. 2.12, та дати пояснення про їх адекватність.

10. Не зрозуміло, чому у рівнянні (1.1) у знаменнику присутня швидкість руху дизель-потягу v , та який фізичний зміст має функція F .

11. Частину матеріалу дисертаційної роботи, зокрема таблиці 2.1 – 2.4 на сторінках 105 – 108, таблиці 4.1 – 4.3 на сторінках 207 – 209 та інші, доцільно було б винести у додатки.

Висновок. Дисертаційна робота Заковоротного Олександра Юрійовича на тему «Синтез автоматизованої системи управління рухомим складом на основі геометричної теорії керування та нейронних мереж», за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.13.07 – автоматизація процесів керування.

Вона є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-прикладну проблему розробки системи підтримки прийняття рішень машиністом дизель-поїзда, яка створює теоретичну передумову побудови автоматичних систем керування швидкісним рухомим складом та дозволяє поліпшити його енергетичні характеристики на основі створення узагальнених математичних моделей та засобів оптимізації динаміки рухомих об'єктів з використанням нових методів й програмного забезпечення, які розширюють область застосування геометричної теорії керування, нової технології обробки інформації на основі стабільно-пластичних нейронних мереж та нових моделей асоціативної пам'яті.

В дисертації отримані науково обґрунтовані результати подальшого розвитку методів синтезу автоматизованих систем керування швидкісним рухомих складом на основі сучасної геометричної теорії керування та нейронних мереж, що дозволяє синтезувати закони керування для складних нелінійних об'єктів в режимі реального часу для розробки системи підтримки прийняття рішень машиністом для автоматизованої системи управління дизель-поїзда, та поліпшити енергетичні характеристики тягового рухомого складу.

Оформлення роботи відповідає вимогам, які пред'являються до докторських дисертацій, а автореферат повністю відображає основні положення дисертації. Зроблені зауваження принципово не знижують високого наукового і практичного рівня дисертаційної роботи, яка в повній мірі відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. щодо здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, а її автор Заковоротний Олександр Юрійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування.

Зав. відділом проблем управління
магнітним полем Інституту технічних
проблем магнетизму
Національної академії наук України,
доктор технічних наук, професор


Б.І. Кузнецов

Підпис д.т.н., проф. Кузнецова Б.І. засвідчую
Вчений секретар, к.т.н.




П.М. Добродєєв