

**ВІДГУК**  
**ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

на дисертаційну роботу Кислого Дмитра Миколайовича  
**«ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВЕДЕННЯ ВАНТАЖНИХ  
ПОЇЗДІВ ТЕПЛОВИАЗАМИ»,**

яку представлено до захисту на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук за спеціальністю  
05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Дисертаційна робота Кислого Д. М., що представлена на захист, надрукована на українській мові й складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 145 найменувань та додатків на 15 сторінках. Повний обсяг дисертації – 156 сторінок, з яких 126 сторінок основного тексту, 56 ілюстрацій, 17 таблиць.

**Актуальність теми дисертації**

Сформоване економічне становище в Україні вимагає підвищення ефективності роботи всіх галузей народного господарства і, в тому числі, залізничного транспорту. В ринкових умовах праці питання зниження експлуатаційних витрат набувають особливого значення. Виконуючи більше половини загальнотранспортного обсягу перевізної роботи, залізничний транспорт споживає близько 15% енергоресурсів, що використовуються всіма видами транспорту. У локомотивному господарстві витрати енергоресурсів на тягу поїздів становлять від 36 до 51% експлуатаційних витрат. Ці дані кількісно підтверджують, що витрати енергоресурсів на здійснення транспортних послуг є одним з основних показників ефективності роботи транспорту в цілому.

У зв'язку з постійним зростанням вартості енергоресурсів, в 2009 р. Кабінету Міністрів України прийняв і затвердив «Стратегію розвитку

залізничного транспорту на період до 2020 року». Програма визначила завдання залізницям скоротити споживання паливно-енергетичних ресурсів на тягу поїздів. У жовтні 2010 р. Кабінетом міністрів України прийнято «Транспортну стратегію України на період до 2020 року», направлену на більш ефективне використання основних фондів залізничного транспорту.

Актуальність даної роботи підтверджується також положеннями «Комплексної державної програми енергозбереження України на 2005-2020 р.р.», Законом України «Про енергозбереження» № 75/94-ВР від 01.07.1994 р, Указом президента України № 603/2000 від 20.04.2000 р. «Про стан залізничного транспорту України та заходи щодо забезпечення його ефективного функціонування».

Найбільші витрати паливно-енергетичних ресурсів припадають безпосередньо на тягу поїздів, їх рівень залежить від економічності тягового рухомого складу, раціональності його використання та відповідності обраного режиму ведення поїзда оптимальному.

Враховуюче вищевикладене, завдання розробки методик та програм розрахунку енергоефективного ведення з урахуванням характеристик поїзда та реальних умов експлуатації є важливим й актуальним.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, та їх достовірність**

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертації Кислого Д. М. отримані за допомогою методів системного аналізу, імітаційного моделювання, числових методів розв'язання диференціальних рівнянь при моделюванні руху поїзда, методів рівномірного пошуку, ітерацій, нелінійного програмування та локальних варіацій при визначенні енергозаощаджуючих режимів керування локомотивом. Поставлені у дисертації задачі розв'язано із застосуванням сучасною математичного апарату з використанням моделювання в пакетах Maple та MS Office.

В дисертаційній роботі в достатньому обсязі наведено матеріал порівняння результатів теоретичних досліджень та експериментів. Адекватність отриманих математичних моделей перевірена за стандартними методами розв'язання диференціальних рівнянь, а саме Рунге-Кутти-Фельберга, Розенброка, класичного, що підтверджує необхідну достовірність одержаних висновків.

Результати дисертації відповідають опублікованим матеріалам науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт у цьому напрямку.

Таким чином можна стверджувати, що наукові положення, висновки та рекомендації, які наведені в дисертаційній роботі, обґрунтовані в повній мірі.

### **Наукова новизна результатів дисертаційної роботи**

Проведений аналіз змісту дисертації показав наявність наукової новизни основних положень, що виносяться дисертантом на захист. У дисертації отримано наукові результати, які є значущими для залізниць України, оскільки вони дозволяють підвищити енергоефективність ведення поїздів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

Автором вперше визначено функції двох змінних раціонального режиму керування локомотивом для окремих фаз руху, які дозволяють одержати енергозаощаджуючу траєкторію руху поїзда за одну ітерацію за рахунок попередньо визначених раціональних співвідношень маса складу – ухил – позиція керування та маса складу – ухил – швидкість руху;

Удосконалено метод виконання тягових розрахунків за рахунок обчислення варіативних траєкторій руху, який дозволяє отримати розв'язання рівняння руху поїзда у вигляді залежності час ходу поїзда – витрата енергоресурсів;

Набув подальшого розвитку метод визначення розподілу часу ходу поїзда по перегонам на підставі раціональних рівномірних швидкостей, що

дозволило обчислювати енергозаощаджуючу траєкторію руху поїзда з урахуванням графікового часу;

Набув подальшого розвитку метод рішення рівняння руху поїзда з визначенням енергозаощаджуючих режимів за рахунок використання методу локальних варіацій, який дозволив одержати мінімальну витрату енергоресурсів за умови обмеження часу ходу поїзда;

Набув подальшого розвитку метод усереднення ухилів за рахунок врахування розподілу маси по довжині поїзда та раціонального інтервалу рішення рівняння потенційної енергії поїзда, що дозволило більш точно враховувати прискорювальні-сповільнювальні сили;

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

Аналіз отриманих у роботі наукових результатів показує їхню відповідність існуючим критеріям та вимогам. Рівень наукової новизни відповідає визначенню здобувача.

### **Практичне значення дисертаційної роботи**

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у розробці науково-обґрунтованого методу розрахунку раціональних режимів керування локомотивом; апаратно-програмного комплексу для розрахунку індивідуальних раціональних режимів безпосередньо на локомотиві під час поїздки.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає у наступному:

– методиці визначення енергозаощаджуючих режимів керування локомотивом;

– методиці визначення індивідуальних енергозаощаджуючих режимів ведення поїздів для підвищення досвіду машиністів;

– впроваджені у науково-виробничому підприємстві «УКРТРАНСАКАД»; кафедрі «Локомотиви» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна у навчальний процес підготовки бакалаврів, спеціалістів та магістрів за спеціальністю 7.07010501 «Локомотиви та локомотивне господарство» (спеціальністю 273 «Залізничний транспорт») при вивченні дисциплін «Теорія локомотивної тяги» та «Математичні методи та моделі», що підтверджено відповідними актами впровадження.

В цілому, є підстави констатувати достатньо високий рівень практичної цінності отриманих наукових результатів.

### **Аналіз змісту дисертації**

Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Зміст автореферату відповідає змісту дисертаційної роботи.

У **вступі** обгрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень, викладено наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок, публікації та апробацію наукових розробок.

**Перший розділ** роботи присвячено аналізу наукових досліджень щодо задачі зниження витрати паливо-енергетичних ресурсів на тягу поїздів. Автор довів, що рішення вказаної задачі можна удосконалити шляхом визначення індивідуальних раціональних режимів окремого поїзда.

Серед розглянутих методів оптимізації в задачах визначення раціональних режимів ведення поїздів з урахуванням умов експлуатації та технічних характеристик виділено найбільш впливові фактори на витрату паливо-енергетичних ресурсів. Визначено, що найбільш перспективними є алгоритми оптимізації на базі нелінійного та динамічного програмування з використанням векторної оптимізації. Для підвищення точності та

адекватність математичної моделі, автор запропонував розглядати поїзд як ланцюг твердих тіл.

**Другий розділ** присвячений розробці математичної моделі руху поїзда, адаптованої для розрахунків згідно поставленої мети. Сформульовано основні вимоги до математичної моделі та обрано стахостичну динамічну математичну модель неперервного типу. Для уніфікації залежностей раціональних режимів ведення складові руху поїзда розділено на кінетичну та потенціальну енергію.

При визначенні потенційної енергії, розглядана фізична модель поїзда дозволяє враховувати сили від профілю колії із заданим інтервалом шляху. Проведено дослідження впливу інтервалу шляху на точність та швидкодію моделі та обрано за раціональний інтервал довжині одиниці рухомого складу, а саме чотиривісного вагона.

Проведено окреме дослідження точності та швидкодії моделі залежно від інтервалу змінних інтегрування рівняння руху поїзда та визначено раціональні кроки інтегрування рівняння руху поїзда, а саме для шляху 50 м та швидкості 1 км/год. Це дозволяє використовувати математичну модель в бортових системах локомотива для оперативного перерахунку раціональних режимів керування при зміні поїзної ситуації. На підставі цього запропоновано умовою вибору кроку розв'язання рівняння руху поїзда обрати рівність відстаней між суміжними точками траєкторії руху в координатах шлях – швидкість відповідно вказаних значень.

За виконанням всіх перерахованих вимог до математичної моделі, її точність складає в середньому 0,42%. Це значення перевірено за стандартними методами числового інтегрування диференціальних рівнянь.

**В третьому розділі** виконано дослідження з визначення енергозаощаджуючих режимів ведення поїздів. Проведено аналіз критеріїв оптимальності та обрано оптимізацію показників за комплексним адитивним критерієм мінімізації; за діапазонами дослідження – локальну оптимізацію; за кількістю керованих параметрів цільової функції обрано методи

багатовимірною пошуку. Відповідно цих критеріїв оптимальності математична модель руху поїзда найбільш точно описує процес переміщення поїзда по ділянці. Визначено, що до праметрів, які узагальнюють економічність обраного режиму ведення, відносяться час ходу поїзда та витрата енергоресурсів. До математичної моделі руху поїзда впроваджено модулі, які описують нелінійними залежностями дизель, кола керування, електричні та механічні елементи передачі потужності.

Для уніфікації раціональних режимів керування траєкторію руху поїзда поділено на окремі режими, для яких складено цільові функції оптимізації. Для окремих фаз руху поїзда, з урахуванням характерних особливостей режиму, складено залежності відповідних коефіцієнтів, як складових цільової функції оптимізації. На підставі аналізу залежностей коефіцієнтів енергоефективності для відповідних фаз руху визначено раціональні співвідношення маси складу, ухилу, позиції керування та швидкості руху. Побудовано функції, залежні від двох аргументів (маси складу та ухилу) раціонального керування локомотивом.

На підставі складених енергозощаджуючих функцій маси складу, ухилу та швидкості руху розроблено алгоритм, який дозволяє раціонально розподіляти час ходу поїзда по перегонах. Цей алгоритм доцільно використовувати при розробці графіків руху поїздів.

При визначенні раціональних режимів керування локомотивом за умови обмеження часу ходу поїзда, автором удосконалено метод виконання тягових розрахунків, який дозволяє отримати розв'язок рівняння руху поїзда у вигляді співвідношення часу ходу поїзда – витрата енергоресурсів. Відповідно цього методу є можливість обирати відповідну траєкторію руху поїзда за умови резерву часу ходу поїзда.

В четвертому розділі автор виконує розробку апаратно-програмного комплексу реєстрації параметрів локомотива для можливості застосування алгоритмів раціонального керування в бортовій системі локомотива та оперативного розрахунку енергозощаджуючого керування. Запропоноване

апаратне забезпечення збирання та обробки тягових параметрів локомотива відповідає умовам роботи на тяговому рухомому складі. Визначені похибки датчиків задовольняють вимогам до приладів, призначених працювати в умовах підвищеної вібрації, коливань температури та перевантажень. Для кожної ланки апаратного комплексу впроваджено систему захисту.

На підставі залежностей раціонального керування автором розроблено програмне забезпечення для визначення індивідуальних раціональних режимів керування локомотивом, оптимізованих за критерієм мінімуму витрат енергоресурсів за умови виконання графіка руху.

Автор відзначає, що додатково розроблений апаратно-програмний комплекс дозволяє розв'язувати задачі діагностування та моніторингу параметрів тягового рухомого складу.

В п'ятому розділі дисертаційної роботи проведено експериментальні дослідження системи реєстрації параметрів локомотива та програмної частини комплексу індивідуальних раціональних режимів ведення.

Згідно проведених експериментальних досліджень системи реєстрації параметрів локомотива, можна стверджувати про доцільність її впровадження як частини бортової системи індивідуальних раціональних режимів.

Експериментальні дослідження програмної частини комплексу індивідуальних раціональних режимів ведення виконано за різними методиками. Проведено додаткові тягові розрахунки за методом Ліпеца-Лебедева, характерною особливістю яких є визначення мінімального часу ходу поїзда по ділянці, при тому витрата енергоресурсів не є цільовим показником. Зібрано статистичні дані під час виконання держбюджетної теми «Виконання аналізу можливих причин відхилення витрат дизельного палива від існуючих норм та підготовка рекомендацій зі зменшення витрат палива» (№ДР 0115U007071) результатів 15 поїздок у прямому напрямку та 10 поїздок у зворотному напрямку на ділянці Миколаїв-Долинське (довжина ділянки 157,5 км). Виконано накладання розрахованої траєкторії на



швидкостемірну стрічку поїздки ділянкою Пологи-Волноваха довжиною 134,4 км. Порівняння методу індивідуальних раціональних режимів з різними методами тягових розрахунків, у т.ч. тими, що враховують оптимізацію режимів ведення, та реальними поїздками дає такі результати підвищення енергоефективності: метод Ліпеца-Лебєдєва – 2,2-3,2 %; фактичні поїздки з нефіксованим часом ходу поїзда – 2-12 %; фактичні поїздки з фіксованим часом ходу поїзда – 2,2-2,6 %.

У шостому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження раціональних режимів ведення.

Для запропонованої системи індивідуальних раціональних режимів ведення, яка входить до складу апаратно-програмного комплексу, розраховано основні показники для оцінки економічної ефективності, а саме чисту приведену вартість, індекс рентабельності, термін окупності, середню норму прибутку. Виконані техніко-економічні розрахунки підтвердили ефективність впровадження комплексу, при тому розрахунковий термін окупності склав шість місяців.

### **Повнота відображення результатів дисертації**

Результати дисертації представлено в 24 наукових працях. Серед них шість наукових статей, п'ять з яких відображають основні наукові результати та опубліковані у спеціалізованих фахових виданнях, в тому числі 4 в журналах, що входять до наукометричних баз даних. На практичну частину роботи отримано свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Програмний комплекс для розрахунку раціональних режимів ведення поїздів тепловозами», 4 патенти на корисну модель, які присвячені апаратній частині комплексу реєстрації тягових параметрів локомотива, а саме «Спосіб визначення потужності дизеля» (для патенти), «Цифровий безконтактний тахометричний блок», «Пристрій для вимірювання величини струму тягових електричних машин тепловозів», опубльковано 13 тез доповідей на міжнародних конференціях: 70, 71, 72, 73, 74 і 75-й міжнародних науково-

практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», які проходили у м. Дніпро з 2010 по 2015; 5 та 6 Міжнародних науково-практичних конференціях «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» в с.м.т. Воловець у 2014 та 2015 роках; Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених, магістрантів та студентів «Науково-технічний прогрес на транспорті» у м. Дніпро 2012 року; 74 Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми розвитку інтелектуальних систем транспорту» у м. Дніпро в 2014 р. Загалом, вважаю апробацію дисертації достатньою.

Розподіл творчого, особистого внеску між співавторами відповідає існуючим вимогам до цієї процедури.

Публікації здобувача повністю відповідають критеріям за кількістю наявності публікацій у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз та достатньої апробації матеріалів дисертації.

### **Основні зауваження до роботи**

1. В пункті 2.3 (с. 42) дисертації автор пропонує усереднювати значення ухилів профілю колії по довжині поїзда, а також з урахуванням розподілу маси по довжині поїзда. В тексті не наведено в яких випадках використовувати перший або другий алгоритм.

2. У розділі 2 (с. 50) доцільно було б більш детально описати умови вибору змінних інтегрування рівняння руху поїзда.

3. В розділі 2 (с. 73) при визначенні енергозощаджуючих режимів керування в режимі тяги автор пояснює нижню межу ухилу тим, що напрям сили від ухилу збігається з напрямком руху для допустимого діапазону швидкостей. Доцільно було б навести графік залежності основного питомого опору для режиму вибігу.

4. На с. 76 в формулі рівномірних швидкостей наведено незрозумілий математичний символ.

5. На с. 84 в таблиці 3.4 вказані зниження швидкості в режимі вибігу відносно початкової швидкості 80 км/год відповідно до рис. 3.17. Доцільніше було б вказати абсолютні значення зниження швидкостей.

6. На с. 102 дисертації у висновках до розділу 4 два пункти пронумеровані однаковим номером.

7. На рис. 5.1 (с. 103) автор наводить часову діаграму магнітного потоку тягового електродвигуна, але не вказує яким чином були отримані дані.

### Висновки

В цілому дисертація Кислого Д. М. виконана на достатньо високому рівні та являє собою закінчену наукову роботу, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати в галузі ведення поїздів, та вирішують науково-прикладне завдання підвищення енергетичної ефективності ведення поїздів.

Представлена дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 11 і 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 року №567, щодо кандидатських дисертацій, а здобувач Кислий Дмитро Миколайович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів.

Офіційний опонент,

кандидат технічних наук, доцент кафедри

«Логістичного управління та безпека руху на транспорті»

Східноукраїнського національного

університету імені В. Даля

С. О. Клюєв

Дідущак  
Захарченко



завідувачу

Л. М. Дітвінська

## **Відгук офіційного опонента**

на дисертаційну роботу Кислого Д.М. «Підвищення енергоефективності ведення вантажних поїздів тепловозами», яку представлено на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Відгук опонента складено на підставі вивчення дисертації, автореферату та праць здобувача, опублікованих за темою дисертації.

### **1. Актуальність теми дисертаційної роботи**

Дисертація спрямована на зниження експлуатаційних витрат залізничного транспорту, велику частину яких складають затрати на енергоносії. Тому тема дисертаційної роботи Кислого Д. М., в якій вирішується задача зниження витрат енергоресурсів на тягу поїздів, є актуальною. Ця задача актуальна також для локомотивобудівних та локомотиворемонтних заводів, оскільки її результати можна використовувати для побудови нових та удосконалення наявних систем енергооптимального керування тяговим рухомих складом.

Актуальність теми дисертації підтверджується і тим, що дослідження, які виконані в науковій роботі, направлені на реалізацію положень «Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року», затвердженої Кабінетом Міністрів України (розпорядження від 16.12.2009 р. №1555-р), та «Транспортної стратегії України на період до 2020 року», затвердженої Кабінетом Міністрів України (розпорядження від 20.10.2010 р. №2174-р.). Відповідно до вказаних документів одним з основних напрямків діяльності залізниць є забезпечення їх тяговим рухомих складом (ТРС) вітчизняного виробництва, здатним істотно підвищити техніко-технологічні показники роботи ТРС за рахунок зниження питомих витрат енергоресурсів, підвищення ефективності використання локомотивів.

Наукові результати дисертаційної роботи отримані в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при виконанні НДР, у яких автор брав безпосередню участь як відповідальний виконавець та виконавець: «Виконання аналізу можливих причин відхилення витрат дизельного палива від існуючих норм та підготовка рекомендацій зі зменшення витрат палива» (№ ДР 0115U007071);

«Виготовлення тривимірної панорами ділянки «Кривий Ріг-Тимкове» (№ ДР 0115U001863).

Мета дисертаційної роботи сформульована автором коректно й полягає у вирішенні науково-практичного завдання – зниження експлуатаційних витрат на переміщення поїзда ділянкою за рахунок вибору економічно обґрунтованих індивідуальних режимів ведення.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій**

Основні наукові положення знайшли достатнє обґрунтування на основі отриманих результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Зокрема, теоретичні дослідження базуються на використанні фундаментальних положень теорії та конструкції локомотивів, теорії тяги поїздів, теорії теплових процесів двигунів внутрішнього згорання, теорії електричних машин та перетворювачів. При цьому було використано числові методи розв'язання диференціальних рівнянь під час моделювання руху поїзда, методи рівномірного пошуку, ітераційні методи, методи нелінійного програмування та локальних варіацій.

Наукові положення, висновки та рекомендації, що базуються на результатах експериментальних досліджень, отримані за допомогою методів інтерполяції, апроксимації та імітаційного моделювання під час моделювання роботи дизеля тепловоза та електричної частини передачі потужності, методів системного аналізу.

Отримані результати не суперечать даним, що містяться у опублікованих матеріалах науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт інших авторів та є розвитком досліджень у вибраному напрямку.

Таким чином можна стверджувати, що наукові положення, висновки та рекомендації, які наведені в дисертаційній роботі, є в повній мірі обґрунтованими.

## **3. Достовірність наукових положень дисертації**

Отримані у роботі наукові результати, висновки та рекомендації є достовірними. Підставою для цього є коректна постановка завдань, використання сучасних методів досліджень, задовільна збіжність теоретичних та експериментальних досліджень, впровадження рекомендацій у виробничий

та навчальний процес.

Достовірність висновків та рекомендацій обумовлена також відповідністю прийнятих припущень характеру задач, що вирішувалися, та теоретичних методів і технічних засобів досліджень.

Під час складання моделі руху поїзда, а саме при моделюванні роботи передачі потужності тепловоза та кіл управління, отримані автором тягові параметри тепловоза порівнювалися з паспортними даними локомотива після ремонту обсягом ПР-3. Достовірність результатів обчислень траєкторій руху поїзда підтверджується, за даними автора, незначними розбіжностями з даними, отриманими з використанням стандартних методів розв'язання диференціальних рівнянь, а саме методів Рунге-Кутти-Фельберга, Розенброка. При цьому твердження автора, що точність розрахунків складає 99 %, на мою думку, є меншою мірою, декілька завищеною.

Точність та достовірність розрахованих параметрів, які характеризують поїздки, а саме час ходу поїзда, витрату енергоресурсів та ін., перевірено порівнянням зі статистичними даними, які базуються на правилах тягових розрахунків. При виконанні досліджень використано статистичний матеріал, отриманий на реальних залізничних ділянках України.

Достовірність експериментальних даних апаратної частини запропонованого комплексу оперативного визначення раціональних режимів управління тяговим рухомим складом доведено визначенням інтегрального значення похибки для різних режимів роботи тягових електричних машин.

Таким чином, методи та моделі, що використані у роботі для вирішення складного комплексу поставлених задач, дають підставу стверджувати, що отримані результати в достатній мірі теоретично та експериментально підтверджені та є достовірними.

#### **4. Наукова новизна отриманих результатів, положень та висновків**

На мій погляд, новими є наступні, отримані в роботі, наукові результати та висновки.

1. Новим можна вважати визначення раціонального режиму керування тяговим рухомим складом для окремих фаз руху, як функції двох змінних. Такий науковий підхід є особливо важливим для одержання оптимального, з огляду на енергоефективності, режиму руху поїзда.

2. До нового можна віднести удосконалення методу тягових розрахунків за рахунок обчислення варіативних режимів (у дисертації – «траєкторій») руху у вигляді залежності часу ходу поїзда від витрат енергоресурсів.

3. Ознаки новизни має подальший розвиток методу визначення розподілу часу ходу поїзда по перегонам на підставі раціональних рівномірних швидкостей для обчислення раціонального режиму руху поїзда з урахуванням графіку руху.

4. Також має відносну новизну подальший розвиток методу усереднення ухилів за рахунок врахування розподілу маси по довжині поїзда.

Аналіз отриманих у роботі наукових результатів показує їхню відповідність існуючим критеріям та вимогам.

## **5. Практичне значення роботи**

Практичне значення дисертаційної роботи складають:

- методика визначення оптимальних з точки зору витрат енергоносіїв режимів управління локомотивом;
- апаратно-програмний комплекс для оперативного розрахунку індивідуальних оптимальних режимів управління у бортових системах локомотивів;
- методика усереднення профілю колії по довжині поїзда з урахуванням розподілу маси потягу та локомотива;
- методика математичного моделювання техніко-економічних характеристик локомотива;
- програма математичного моделювання руху поїзда в середовищі «Maple».

Зокрема, методику визначення індивідуальних оптимальних (енергозаощаджуючих) режимів ведення поїздів впроваджено у науково-виробничому підприємстві «Укртранскад» для підвищення кваліфікації машиністів. Матеріали дисертації використовуються у навчальному процесі кафедри «Локомотиви» ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна при підготовці бакалаврів, спеціалістів та магістрів за спеціальністю «Локомотиви та локомотивне господарство» (273 «Залізничний транспорт») в курсах «Теорія локомотивної тяги» та «Математичні методи та моделі», що підтверджено

актами впровадження.

## **6. Повнота викладу наукових положень дисертації в опублікованих працях**

За темою дисертації опубліковано 24 наукові праці. Положення викладено в 6 наукових статтях, п'ять з яких відображають основні наукові результати та опубліковані у спеціалізованих фахових виданнях, в тому числі 4 в журналах, що входять до науко-метричних баз даних.

На практичну частину роботи отримано свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, а саме «Програмний комплекс для розрахунку раціональних режимів ведення поїздів тепловозами», 4 патенти на корисну модель, які присвячено апаратній частині комплексу реєстрації тягових параметрів локомотива, 13 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Зміст автореферату й основних положень дисертації є ідентичними.

## **7. Оцінка змісту дисертації**

Текст дисертаційної роботи викладено чітко у відносно логічній послідовності.

У вступі наводиться обґрунтування обраної теми, її актуальність, показано зв'язок роботи з Державними та галузевими програмами, сформульовано мету та завдання досліджень, наведено авторську оцінку наукової новизни та практичного значення, зазначено об'єкт та предмет дослідження. Наведені відомості щодо публікацій основних результатів та їх апробації, дані про впровадження результатів роботи, та особистий внесок автора у отриманні результати роботи.

*В першому розділі* за результатами аналізу розглянутої науково-технічної літератури та робіт провідних вчених та наукових організацій за темою дисертації виконано аналіз методів підвищення енергоефективності ведення поїздів й встановлено, що задача визначення раціональних режимів керування тяговим рухомим складом вирішена не в повному обсязі.

Означено основні напрямки дослідження, а саме оптимізація режимів руху поїздів, розробка оптимальних, з огляду на енергозаощадження, графіків руху поїздів, автоматизація та організація керуючої діяльності машиніста. Наведено основні відмінності вказаних напрямків, вказано на їх переваги та недоліки.



Сформульовані мета та задачі дисертаційної роботи. Основним напрямом підвищення економії енергоресурсів автор обрав використання раціональних режимів ведення поїздів з визначенням індивідуальних раціональних режимів окремого поїзда. Методом розв'язання рівняння руху поїзда обрано аналітичний, визначення енергоефективних режимів – за методом нелінійного програмування з використанням методу локальних варіацій.

*У другому розділі* при моделюванні процесу руху поїзда складено імітаційну модель, в якій поїзд розглядається як ланцюг твердих тіл з жорсткими зв'язками. Для ймовірнісного врахування змінних факторів, які діють на поїзд, в математичну модель введено стохастичні динамічні характеристики.

При визначенні потенційної енергії, модель поїзда дозволяє враховувати зміну сил, викликаних ламаним профілем колії з заданим інтервалом шляху. Автор обрав інтервал шляху, який відповідає довжині одиниці рухомого складу.

*В третьому розділі* роботи виконано аналіз критеріїв оптимальності та параметрів, які впливають на економічність режиму ведення поїзда. Складено цільову функцію оптимізації за формулою: режим ведення поїзда оптимізувати за двома параметрами – мінімальним часом ходу поїзда при мінімальних витратах енергоресурсів.

Для визначення оптимальних режимів керування локомотивом адаптовано математичну модель руху поїзда з урахуванням нелінійних залежностей характеристик силової установки, ланок передачі потужності, кіл керування та гальмівного обладнання.

Шлях руху поїзда поділено на окремі фази та виконано оптимізацію для кожної з них. Розраховано коефіцієнти енергоефективності, які характерні для кожної фази.

Для фази рушання та розгону, характерною ознакою якої є інтенсивна зміна кінетичної енергії поїзда, введено коефіцієнт питомої витрати палива при розгоні у витраті палива за одиницю часу на одиницю маси поїзда при фіксованій потужності силової установки. Досліджено поведінку вказаного коефіцієнта з різними масами потягу та значеннями ухилів, визначено характерні точки, які задовольняють цільовій функції.

Раціональні режими управління узагальнено побудовою тривимірної залежності маси потягу, значень ухилів та позиції контролера машиніста.

Для фази тяги з підтриманням постійної кінетичної енергії, введено коефіцієнт питомої витрати палива під час руху на рівномірній швидкості у витраті палива на одиницю (1 МДж) кінетичної енергії поїзда.

Побудовано тривимірні залежності маси потягу, значень ухилів та позиції контролера машиніста для узагальнення керування локомотивом, а також маси потягу, значень ухилів та рівномірної швидкості руху для оцінки, коригування та раціонального розподілу часу ходу поїзда по перегонах.

Фаза вибігу передбачає використання накопиченої кінетичної енергії поїзда.

Для визначення раціонального керування введено коефіцієнт енергоефективності вибігу, що вимірюється у витраті палива за одиницю часу (год.), що відповідає зменшенню кінетичної енергії поїзда. Аналіз залежності цього коефіцієнта показав межі діапазону, у яких доцільно зменшувати швидкість при регульовальному гальмуванні та гальмуванні до зупинки.

Для фази гальмування в дисертаційній роботі складено алгоритм та розв'язано задачу прицільного гальмування.

**Четвертий розділ** присвячено розробці апаратно-програмного комплексу реєстрації параметрів руху локомотива. Сформульовано вимоги до апаратно-програмного комплексу оперативного розрахунку раціональних режимів керування локомотивом. Розроблено апаратне забезпечення збирання та обробки тягових параметрів локомотива для визначення поточних даних про режим роботи та потужність тягового рухомого складу для можливості оперативного розрахунку раціонального режиму ведення.

Апаратний комплекс складається з набору первинних датчиків для вимірювання фізичних величин та блоку збирання вимірних даних.

Первинні датчики розроблено для умов роботи тяговому рухомому складі в магнітно-напруженому середовищі, температурних коливаннях, вібрації та імовірних перевантаженнях. Блок збирання вимірних даних виконує опитування датчиків, систематизацію отриманих даних та їх передачу на блок операційного обчислення раціональних режимів по високочастотному бездротовому каналу, який в свою чергу забезпечує додаткову гальванічну

розв'язку.

Програмна частина комплексу поєднує в собі алгоритми індивідуальних раціональних режимів керування локомотивом.

*В п'ятому розділі* наведено результати експериментальних досліджень апаратної та програмної частини комплексу індивідуальних раціональних режимів ведення.

В роботі оцінку ефективності індивідуальних раціональних режимів виконано порівнянням розрахованих траєкторій руху поїзда з швидкостемірною стрічкою; траєкторіями, отриманими за існуючими алгоритмами визначення раціональних режимів ведення, зокрема за методом Ліпеца–Лебедева, який є загальноприйнятим та визначає мінімальний час прямування поїзда; статистичними даних форм ТУ-3, 4526L. Одержані результати свідчать про те, що за рахунок використання індивідуальних раціональних режимів ведення поїзда, обчислених за вищенаведеним алгоритмом, економія енергоресурсів може складати від 2 до 12 %.

*В шостому розділі* виконано техніко-економічні розрахунки оцінки ефективності впровадження апаратно-програмного комплексу для визначення індивідуальних раціональних режимів ведення поїзда. Визначено такі показники як чиста приведена вартість, індекс рентабельності, термін окупності та інші. Розрахунковий термін окупності апаратно-програмного комплексу склав шість місяців.

## **8. Зауваження по дисертації**

1. В першому розділі при аналізі математичних методів розв'язання рівняння руху поїзда, в тому числі з метою підвищення енергоефективності, не достатньо детально описано переваги та недоліки існуючих методів.

2. При визначенні цільової функції оптимізації не достатньо чітко описано взаємозв'язок між двома параметрами часом ходу поїзда та витратами енергоресурсів.

3. Не достатньо обґрунтованими є визначені автором кроки інтегрування рівняння руху поїзда для шляху ( $\Delta s=50$  м) та швидкості ( $\Delta v=1$  км/год). В якості критерія зазначено «достатню точність» розрахунків, при цьому критерій «достатньої точності» не визначено.

4. Пошук раціонального інтервалу інтегрування рівняння руху поїзда,

який, за твердженням автора, «безпосередньо впливає на точність математичної моделі», не є науковою задачею і тем більше не є актуальним питанням при сучасному рівні комп'ютерів.

5. У декількох місцях роботи автор аналізує точність одержаних розрахункових результатів і приводить такі значення похибки, як 0,42 %, 1,45%, 0,5% або точність – 99%, що не є суттєвим при теоретичних дослідженнях.

6. На мій погляд є не зовсім коректним оцінювати точність математичної моделі за похибкою у порівнянні з методами числового інтегрування диференційних рівнянь, бо обидва методи є теоретичними. Загальноприйнятим доказом точності математичної моделі вважається, як відомо, порівняння теоретичних результатів із експериментальними.

7. На стор. 41 серед складових формули (2.6) є величина ККД з індексом «сігма», зміст якої не визначено.

8. На стор. 43 в формулі (2.12) та на стор. 46 в формулі (2.18) профіль колії позначається різними індексами, що створює деяку плутанину при вивченні матеріалу.

9. Дисертація містить невелику кількість незрозумілих чи невизначених математичних символів (напр., стор. 76, 77), неточних значень (напр., табл. 3.4), орфографічних помилок (напр., стор. 101), неточного використання термінів (напр., «склад» замість «поїзд»).

10. На мій погляд структура дисертації занадто громіздка. Розділи 2 і 3 та 4 і 5 доцільно було б об'єднати.

Проте, вказані зауваження не впливають на загальний науковий рівень дисертації, а частина з них може бути предметом дискусії.

## **8. Загальна оцінки дисертації**

Аналіз змісту дисертації та автореферату, публікації автора за темою роботи дозволяють зробити наступні висновки.

Дисертаційна робота Кислого Д. М. «Підвищення енергоефективності ведення вантажних поїздів тепловозами» є завершеною кваліфікаційною працею, в якій отримані нові науково-обґрунтовані теоретичні і експериментальні результати, що в сукупності вирішують конкретну наукову

задачу, а саме підвищення енергоефективності тяги поїздів, що має суттєве значення для транспортної науки.

Питання, які досліджені в дисертації, є пріоритетними для розвитку теоретичних основ раціоналізації режимів ведення поїздів.

Робота відповідає паспорту спеціальності 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів, зокрема пунктам: «Теорія тяги поїздів, методи тягових розрахунків», «Технічні засоби для енерго- та ресурсоощадження на залізничному транспорті», «Системи автоматичного регулювання й управління тяговим рухомих складом», та профілю спеціалізованої вченої ради Д08.820.02.

Актуальність, достатній науковий рівень, практична цінність та впровадження результатів досліджень, обсяг основного тексту, структура, порядок подання та оформлення матеріалів у авторефераті дисертації та самій роботі відповідають вимогам МОН України до кандидатських дисертацій, а її автор роботи – Кислий Дмитро Миколайович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів.

Офіційний опонент,  
д-р техн. наук, професор,  
завідувач кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць»  
Державного економіко-технологічного  
університету транспорту



В.П. Ткаченко

15.05.2017

Ткаченко В.П. завідувач  
Старший інспектор ВК Шуф. А.О. Москаленко