

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ГЛАВЧЕВ ДМИТРО МАКСИМОВИЧ**

УДК 681.5.015.24:629.424

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНІ КОМПОНЕНТИ КОМП'ЮТЕРНОЇ**  
**СИСТЕМИ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ**

123 – Комп'ютерна інженерія

12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктор філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело  
\_\_\_\_\_ Д.М. Главчев

Наукові керівники:  
Дмитрієнко Валерій Дмитрович,  
доктор технічних наук, професор  
Заковоротний Олександр Юрійович  
доктор технічних наук, професор

Харків – 2020

## АНОТАЦІЯ

*Главчев Д.М.* Моделі, методи та програмні компоненти комп'ютерної системи тягового рухомого складу. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 123 – Комп'ютерна інженерія – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2020.

*Об'єктом дослідження* є процеси управління тяговим рухомим складом за допомогою бортової комп'ютерної системи, яка використовується у дизель-потягах серії ДЕЛ-02.

*Предметом дослідження* є моделі, методи та програмні компоненти, які використовуються в комп'ютерній системі тягового рухомого складу, та розширюють область застосування геометричної теорії управління при синтезі оптимальних управлінь рухомим складом, а також методи і засоби розробки сучасних програмних комплексів в рамках розробки комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень машиніста дизель-потяга серії ДЕЛ-02.

У вступі акцентовано увагу та обґрунтовано актуальність теми, що досліджується, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, наведено наукову новизну, а також, сформульовано практичне значення отриманих результатів.

В першому розділі здійснено аналітичний огляд моделей, методів та програмних компонентів, що використовуються в комп'ютерних системах управління тяговим рухомим складом. Розглянуто особливості структури та роботи подібних систем на залізничному транспорті в Україні та світі (Китай, Індія, Німеччина, країни СНД). На прикладі роботи таких систем було розглянуто їх структуру, технічні характеристики, область застосування та особливості використання. В рамках першого розділу, також, було розглянуто математичну модель об'єкта управління, приклад методу лінеаризації даної математичної моделі, метод пошуку функцій перетворення, які пов'язують

змінні лінійної та нелінійної математичної моделей. Також, було розглянуто можливості використання нейромережевої асоціативної пам'яті в системах управління та проаналізовано методи синтезу оптимальних систем управління.

В результаті, було обрано основні напрямки досліджень та поставлено основні задачі дисертаційної роботи.

В другому розділі було розглянуто питання перетворення нелінійних математичних моделей в еквівалентні лінійні математичні моделі в формі Бруновського. Також, було розглянуто методи спрощення аналітичних перетворень під час виконання процесу лінеаризації за рахунок перетворення до лінійного вигляду нелінійних систем з різною кількістю одночленів в правих частинах диференціальних рівнянь початкового об'єкту, а також, відокремлення лінійного рівняння від системи в цілому. Дані методи було перевірені шляхом моделювання руху по відрітку маршруту початкового об'єкту у вигляді нелінійної системи диференціальних рівнянь та об'єкту перетвореного у лінійну форму Бруновського, з подальшим порівнянням отриманих результатів, які показали співпадіння, що свідчить про те, що у разі використання даного методу лінеаризації отримується лінійна математична модель, яка є повністю еквівалентною початковій нелінійній моделі. Додатково, було виконано лінеаризацію більш складної нелінійної математичної моделі, що описує роботу потяга з двома окремими двигунами. Перевірка результатів моделювання отриманої лінійної моделі показала повну еквівалентність її нелінійній формі.

Результати досліджень дозволили отримати ряд наукових результатів:

- визначено залежність кількості та складності розрахунків під час проведення лінеаризації та пошуку функцій перетворень, від кількості одночленів в правій частині рівнянь нелінійної математичної моделі;
- запропоновано два нових методи пошуку функцій перетворення, що пов'язують змінні лінійної та нелінійної моделей, що дозволяють розширити область застосування ГТУ на об'єкти, праві частини диференціальних рівнянь яких містять більше двох одночленів;

- запропоновано метод зниження кількості обчислень при виконанні лінеаризації за рахунок відокремлення лінійного рівняння від системи;
- виконано перевірку розробленого методу виконання лінеаризації та пошуку функцій перетворення, який показав свою роботоспроможність на більш складних математичних моделях, зокрема на моделі, що описує роботу потяга з використанням двох еквівалентних двигунів.

В третьому розділі розглянуто питання створення нового методу для пошуку функцій перетворення з використанням нейронних мереж. В рамках даного розділу запропоновано нову нейронну мережу, яка може бути використана для пошуку функцій перетворення. Наряду з цим в даному розділі було запропоновано новий табличний метод пошуку функцій перетворення, який є простим та наочним, та може використовуватися для швидкого отримання результатів.

Дослідження, проведені в даному розділі дозволили отримати наступні наукові результати:

- створено та запропоновано нову нейронну мережу для пошуку функцій перетворення, що пов'язують змінні нелінійної та лінійної моделей об'єкта управління, а це, в свою чергу, розширює область застосування геометричної теорії управління;
- запропоновано новий табличний метод для пошуку функцій перетворення, який є досить простим для сприйняття та достатньо наочним. В рамках цього, запропоновано систему рівнянь в частинних похідних з обмеженнями у вигляді диференціальних нерівностей, представляти у вигляді відповідної таблиці, яка дає змогу в наочному вигляді отримувати залежність функцій перетворень від аргументів, також формувати системи лінійних однорідних рівнянь, за допомогою яких можна буде звужувати область пошуку функцій перетворення.

В четвертому розділі присвячено увагу програмним компонентом бортової комп'ютерної системи, а також розробленому програмному забезпеченню, що

дозволяє розширити область застосування геометричної теорії управління. А саме, було розглянуто нові функціональні можливості розробленого програмного забезпечення, описано його основні характеристики та структуру. В рамках опису розробленого програмного забезпечення особливу увагу приділено структурі та опису роботи окремих функціональних блоків програми, розробці структури інтерфейсу, надійності програмного забезпечення, компонентів для вирішення завдань управління за допомогою геометричної теорії управління, оцінці якості програмного забезпечення. Також, в даному розділі приведено приклад роботи розробленого програмного забезпечення. В даному розділі приведено результати рішення завдання оптимального руху дизель-потягу по маршруту його прямування, в рамках чого було виконано моделювання руху потяга по його маршруту прямування, та порівняння отриманих даних з даними руху реального потяга. Також, було виконано спробу підвищити ефективність руху потяга за рахунок оптимізації окремих множин перегонів з урахуванням особливостей маршруту прямування.

В рамках даного розділу були отримані наступні наукові результати:

- розроблено нове програмне забезпечення, яке отримало подальший розвиток завдяки використанню можливостей сучасних мов програмування. Розроблене програмне забезпечення є більш стабільним завдяки блоку тестування, більш зручним завдяки створеному графічному інтерфейсу користувача, більш функціональним, адже воно може виконувати процес лінеаризації та пошуку функцій перетворення, але при цьому багато з функціональних можливостей є автоматизованими. В вихідних даних наявні коментарі та пояснення, що збільшує рівень зручності користування даним програмним забезпеченням, крім того, характеристики програми відповідають вимогам стандарту з якості програмного забезпечення;

- було виконано дослідження залежності кількості спожитого палива під час руху потяга від особливостей рельєфу місцевості, стилю ведення потяга та розкладу його руху.
- було запропоновано та протестовано метод зниження кількості спожитого палива, використовуючи особливості рельєфу місцевості, допустимі відставання чи випередження графіку руху потяга, а також визначення оптимального стилю руху як для маршруту в цілому, так і для його окремих частин;
- було виконано моделювання руху потяга по реальному маршруту, а результати порівняні з реальним потягом, що курсує цим маршрутом, результати показали правильність моделювання.

Отже, дисертаційна робота присвячена розв'язанню науково-прикладної задачі, а саме, розробки моделей, методів та програмних компонентів комп'ютерної системи тягового рухомого складу, яка створена на основі узагальнених математичних моделей, розробленого програмного забезпечення, а також, засобів оптимізації управління рухомими об'єктами з використанням нових методів, а також використання нової структури нейронних мереж для пошуку функцій перетворення, що дозволило розширити область застосування геометричної теорії управління, що створює передумови для розробки автоматичних систем управління потягом та дозволяє поліпшити характеристики, пов'язані з об'ємами споживання енергоресурсів.

Вдосконалена модель дизель-потяга враховує основні види взаємодії потяга та профілю шляху, а саме, повороти, нахили, а також роботу двигунів потяга, що адекватно відображає процеси, які відбуваються в реальному дизель-поїзді.

Було створено спеціалізоване програмне забезпечення, що має графічний інтерфейс користувача, а також відповідає вимогам оцінки якості програмного забезпечення. Дане програмне забезпечення реалізує вдосконалену структуру людино-машинної системи, дає можливість виконати автоматизацію

аналітичних перетворень геометричної теорії управління у форму Бруновського. Нова структура нейронних мереж, базується на нейронних мережах типу АРТ, що дозволяє вирішувати завдання, що мають декілька рішень. Це дозволило виконати розробку нового методу пошуку функцій перетворення, які зв'язують змінні нелінійних та лінійних моделей у формі Бруновського. Для збільшення ефективності процесу лінеаризації було запропоновано декілька методів спрощення процесу розрахунків за рахунок зменшення кількості елементів в правій частині початкової системи диференціальних рівнянь, та за рахунок відокремлення першого рівняння, яке саме по собі вже є лінійним, від загальної системи в цілому.

Виконані дослідження та розробки дозволили вдосконалити структуру бортової комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень машиніста дизельного потяга, що дозволило, в реальних умовах руху динамічного об'єкту, під час змін дорожніх умов, виконувати перерахунки та видавати машиністу нові рекомендації щодо керування, які дозволяють продовжити рух по маршруту з дотриманням графіку та мінімальними витратами паливо-енергетичних ресурсів.

Проведено дослідження на реальному об'єкті та математичних моделях. Результати досліджень підтвердили правильність використовуваних інструментів, методів та алгоритмів, на основі яких були запропоновані відповідні рішення, які лягли в основу розробленого програмного забезпечення.

*Ключові слова:* геометрична теорія управління, комп'ютерні компоненти, бортова комп'ютерна система, лінеаризація, математична модель динамічного об'єкту, нейронні мережі, пошук функцій перетворення, форма Бруновського.

*Список публікацій здобувача.*

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:*

1. Главчев Д.М. Нейронная сеть, распознающая группы изображений / В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов, Д.М. Главчев / Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2015, № 32 (1141). – С. 42 – 50.

2. *Главчев Д.М.* Метод поиска функций преобразования, связывающих переменные нелинейных и линейных моделей в ГТУ / *В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев* / Вісник НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2016. – Вип. 44 (1216). – С. 14 – 30.

3. *Главчев. Д.М.* Линеаризация математической модели, описывающей процессы управления подвижным составом, методами дифференциальной геометрии / *В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, Н.В. Мезенцев, Д.М. Главчев* // Вісник НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2017. – Вип. 21 (1243). – С. 38 – 52.

4. *Glavchev D.M.* Geometrical theory of control in the problems of minimizing the energy consumption for a traction electric drive / *V.D. Dmitrienko, A.Y. Zakovorotniy, V.I. Noskov, N.V. Mezentsev, D.M. Glavchev, A.A. Kharchenko* / Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – № 41. – С. 3 – 16.

5. *Главчев Д.М.* Исследование возможностей программных компонент бортовой вычислительной системы при преобразовании нелинейных систем к эквивалентным линейным / *В.Д. Дмитрієнко, А.Ю. Заковоротный, М.В. Мезенцев, Д.М. Главчев* // Вісник НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2018. – № 24. – С. 80 – 98.

6. *Главчев Д.М.* Исследование метода поиска функций преобразования нелинейных систем к эквивалентным линейным в геометрической теории управления / *В.Д. Дмитрієнко, А.Ю. Заковоротный, Н.В. Мезенцев, Д.М. Главчев* // Вісник НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2018. – № 42 (1318). – С. 20 – 35.

7. *Главчев Д.М.* Программная компонента для поиска решений системы уравнений в частных производных в ГТУ методом группового учёта аргументов / *В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, С.Ю. Леонов, Д.М. Главчев* // Вісник НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2019. – №13 (1338). – С. 61 – 72.

8. *Главчев Д.М.* Програмні компоненти бортової комп’ютерної системи дизель-потяга / *Главчев Д. М.* / Системи управління, навігації та зв’язку, Полтава: ПНТУ, 2019, випуск 5 (57). – С. 11 – 15.

9. *Glavchev D.M.* Complex driver movement mathematical model of the tractive rolling stock / *V.D. Dmitrienko, A.Y. Zakovorotniy, V.I. Noskov, N.V. Mezentsev,*



*D.M. Glavchev, A.A. Kharchenko / Teka. commission of motorization and energetics in agriculture – 2018, vol. 18, no. 4, 21-30. Lublin, Poland.*

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

10. *Главчев Д.М. Программное обеспечение для оптимизации процессов управления дизель-поездом / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев / Проблеми інформатики та моделювання: тези чотирнадцятої міжнар. наук.-техн. конф., Ялта, 22-28 вересня 2014. – Харків: НТУ “ХПІ”. – С. 39.*

11. *Главчев Д.М. Программное обеспечение для моделирования движения дизель-поезда / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев / Информатика, управління та штучний інтелект. Тезиси науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2014. – С. 24.*

12. *Главчев Д.М. Программное обеспечение для моделирования динамического объекта / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев / VIII університетська науково-практична студентська конференція магістрантів. Інформаційні технології та інтелектуальна власність – НТУ “ХПІ”, 2014. – С. 140.*

13. *Главчев Д.М. Розробка програмного забезпечення для підтримки прийняття рішень машиністом дизель-потяга серії ДЕЛ-02 / Д.М. Главчев / Вісімнадцята всеукраїнська (тринадцята міжнародна) студентська наукова конференція з прикладної математики та інформатики СНКПМІ-2015, Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2015. – С. 113 – 114.*

14. *Главчев Д.М. Программное обеспечение для поддержки принятия решений машиністом дизель-поезда / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев / Тези доповіді ХХІІІ Міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2015. – С. 38.*

15. *Hlavchev D.* Mathematical model of mechanical part of allocate electric engine in diesel-trains / *V. Dmitrienko, A. Zakovorotniy, D. Hlavchev* / Інформатика, управління та штучний інтелект / Матеріали другої науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2016. – С. 26.

16. *Главчев Д.М.* Нейронные сети для реализации многомерных ассоциаций / *В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов, С.А. Граборов, Д.М. Главчев* // Тези доповіді XXIV Міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2016. – С. 130.

17. *Главчев Д.М.* Бортовая компьютерная система поддержки принятия решений машинистом дизель-поезда / *Д.М. Главчев* / 20-й Ювілейний Міжнародний молодіжний форум “Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті”. Зб. Матеріалів форуму. Т.7. – Харків: ХНУРЕ. 2016. – С. 66 – 67.

18. *Главчев Д.М.* Метод и программное обеспечение для поиска функций преобразования, связывающих переменные линейных и нелинейных моделей в ГТУ / *В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев* / Інформатика, управління та штучний інтелект. Тезиси науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2017. – С. 41.

19. *Главчев Д.М.* Метод определения функций преобразования геометрической теории управления, связывающих переменные линейных и нелинейных моделей / *В.Д. Дмитриенко, Н.В. Мезенцев, Д.М. Главчев* / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я. Тези доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD 2017. 17-18 травня 2017р.: у 4 ч. Ч. IV / за ред. проф. Сокола С.І. – Харків, НТУ “ХПІ”, – С. 79.

20. *Главчев Д.М.* Интеллектуальная система поддержки принятия решений оператором для управления технологическим процессом / *В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов, Д.М. Главчев* / Матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конференції “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних

процесах”. Одес. Нац. акад. зв’язку ім. О.С. Попова. – Одеса – Хмельницький: ХНУ, 2017. – С. 97.

21. *Главчев Д.М.* Вопросы поиска функций преобразования, связывающие переменные линейной и нелинейной модели в геометрической теории управления / *В.Д. Дмитрієнко, А.Ю. Заковоротный, Н.В. Мезенцев, Д.М. Главчев* / Тези XVII Міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми інформатики та моделювання”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2017 (Харків – Одеса) – С. 28.

22. *Главчев Д.М.* Разработка программного обеспечения для линеаризации математических моделей в геометрической теории управления / *В.Д. Дмитрієнко, А.Ю. Заковоротный, Н.В. Мезенцев, Д.М. Главчев* / Тези доповіді XXVI Міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2018. – С. 173.

23. *Главчев Д.М.* Проблемы преобразования нелинейных систем управления технологическими процессами к эквивалентным линейным в форме Бруновского / *В.Д. Дмитрієнко, С.Ю. Леонов, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев* / Матеріали XVIII міжнар. наук.-техн. конференції “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”. – Одес. Нац. акад. зв’язку ім. О.С. Попова. – Одеса, 2018. – С. 25 – 26.

24. *Главчев Д.М.* Возможности программных компонент бортовой вычислительной системы при преобразовании нелинейных систем к эквивалентным линейным / *В.Д. Дмитрієнко, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев* / Тези XVIII Міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми інформатики та моделювання”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2018 (Харків – Одеса). – С. 6.

25. *Главчев Д.М.* Возможности нейронных сетей для построения базы знаний в программных компонентах бортовой вычислительной системы / *В.Д. Дмитрієнко, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев* / Інформатика, управління та штучний інтелект. Матеріали п’ятої міжнародної науково-технічної

конференції студентів, магістрів та аспірантів. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2018. – 116 с.

26. *Главчев Д.М.* Нейронна мережа для пошуку функцій перетворення, що пов'язують змінні лінійних і нелінійних моделей в ГТУ / *В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, С.Ю. Леонов* / Матеріали ХІХ міжнар. наук.-техн. конференції “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”. – Одеса, 2019. – С. 40 – 42.

27. *Главчев Д.М.* Поиск решений системы уравнений в частных производных методом группового учета аргументов / *В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, С.Ю. Леонов, Д.М. Главчев* / Тези ХІХ Міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми інформатики та моделювання”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2019 (Харків – Одесса). – С. 10.

*Опубліковані праці які додатково відображають наукові результати:*

28. *Главчев Д.М.* Комп'ютерна програма для людино-машинної системи, що автоматизує аналітичні перетворення геометричної теорії керування / *В.Д. Дмитрієнко, А.Ю. Заковоротний, Д.М. Главчев* / Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 74937. Зареєстр. в Держ. службі інтелектуальної власності України 23.11.2017. Авторське свідоцтво.

29. *Главчев Д.М.* Комп'ютерна програма “Програмний комплекс для бортової розрахункової системи” / *Д.М. Главчев* / Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 79771. Зареєстр. в Держ. службі інтелектуальної власності України 13.06.2018. Авторське свідоцтво.

## SUMMARY

*Hlavchev D.M.* Models, methods and software components of a computer system of traction rolling stock. Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis is submitted to obtain a scientific degree of Doctor of Philosophy, specialty 123 – Computer Engineering – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” , Kharkiv, 2020.

*The object of the research* is the processes of managing the traction rolling stock with the help of an on-board computer system used in the DEL-02 series diesel trains.

*The subject of research* are models, methods and corresponding software components used in the computer system of traction rolling stock, which extend the using scope of geometric control theory for the synthesis of optimal controls of rolling stock, as well as methods and tools for the development of modern software complexes in the development of computer decision support systems of the diesel train driver of the DEL-02 series trains.

The introduction focused and explained on the relevance of the topic being researched, shows the relationship with scientific programs, plans and topics, presents the scientific novelty, as well as formulates the practical significance of the results.

The first section provides an analytical overview of models, methods and software components used in computerized decision support systems of the diesel train driver and train control systems. The peculiarities of the structure and peculiarities of using such systems on rail transport in Ukraine and in the world (China, India, Germany, CIS countries) are considered. On the example of the operation of such systems considered their structure, specifications, applications and features of use. The first section also deals with the mathematical model of a control object, an example of a method of linearization of a given mathematical model, a method of finding transform functions that relate variables of linear and nonlinear mathematical models. Also, the possibility of using neural network associative memory in control systems was considered and methods of synthesis of optimal control systems were analyzed.

As a result, the main directions of research were selected and the main tasks of the dissertation were set.

In the second section, the question of converting nonlinear mathematical models into equivalent linear mathematical models in the form of Brunovsky was considered. Also, methods of simplifying analytical transformations during the linearization process by converting to a linear kind of nonlinear systems with different numbers of monomials in the right-hand sides of the differential equations of the initial object, as well as separating the linear equation from the other part of the system of equations, were considered. These methods were verified by modeling the motion along the path of the initial object in the form of a nonlinear system of differential equations and the object transformed into a linear Brunovsky form, with further comparison of the results obtained, which showed coincidence, which indicates that in the case of using this the linearization method allows to obtain a linear mathematical model that is completely equivalent to the original non-linear model. Additionally, linearization of a more complex nonlinear mathematical model describing the operation of a train with two separate engines was performed, and the verification of the results of the linear model simulation showed complete equivalence to its original form.

Research results have yielded a number of scientific results:

- dependence of quantity and complexity of calculations during linearization and search of transformation functions on the number of monomials in the right part of equations of nonlinear mathematical model is determined;
- two new methods of finding transform functions are proposed that relate variables of linear and nonlinear models that extend the scope of geometric control theory to objects whose right-hand sides of differential equations contain more than two monomials;
- was proposed a method of reducing the number of calculations when performing linearization by separating a linear equation from the system;

- this method was tested, which showed its workability on more complex mathematical models, in particular, on a model that describing the operation of a train using two equivalent motors.

In the third section of the paper, the question of creating a new method for finding functions of transformation using neural networks was considered. In this section proposes a new neural network that can be used to search for conversion functions. In addition, this section proposes a new tabular method of finding conversion functions, which is simple and clear and can be used to get results when performing the calculation process.

The studies conducted in this section have yielded the following scientific results:

- a new neural network has been created and proposed for searching the conversion functions that relate variables to nonlinear and linear models of a control object, which in turn widens the scope of geometric control theory;
- a new tabular method for finding conversion functions is proposed, which is simple enough to understand and sufficiently visual. In this context, it is proposed to present a system of partial differential equations with constraints in the form of differential inequalities in the form of a corresponding table, which allows to visualize the dependence of transformation functions on arguments, as well as to form systems of linear homogeneous equations by which it is possible to narrow the search area of conversion functions.

The fourth section focuses on the software components of the on-board computer system, as well as the developed software that extends the scope of geometric control theory. Specifically, shows with new functionality of designed software and describes its main characteristics and structure. In the framework of the description of the developed software, special attention is paid to the structure and description of the operation of individual functional blocks of the program, the development of the interface structure, the reliability of the software, components for solving control problems using geometric control theory, evaluation of the quality of the software.

Also, this section gives an example of how the developed software works. In addition, this section presents the results of solving the problem of optimal motion of the diesel train along the route of its direction, in which the simulation of the train movement along the route was performed and the comparison of the obtained data with the data of the movement of the real train, as well as an attempt to improve the efficiency of train movement due to the optimization of individual sets of routes, taking into account the features of the route.

The following scientific results have been obtained within this section:

- new software has been developed that has been further developed through the use of modern programming languages. The developed software is more stable due to the testing unit, more convenient due to the created graphical user interface, more functional, because it can perform the process of linearization and search of conversion functions, many of the functionality are automated, there are comments and an explanation that increases the ease of use of this software, in addition, the characteristics of the program meet the requirements of the standard of program quality;
- the study of the dependence of the amount of fuel consumed during train movement on the features of terrain, the style of running the train and its schedule;
- a method of reducing the amount of fuel consumed was proposed and tested, using terrain features, permissible lag or advance of the train timetable, as well as determining the optimal driving style for the route as a whole and for its individual parts;
- the train simulation was performed on a real route, and the results showed that the simulation was correct, because it was compared to the real train running on this route.

Therefore, the dissertation is devoted to the solution of the scientific-applied problem, namely, the development of models, methods and software components of the computer system of traction rolling stock, which is created on the basis of



generalized mathematical models, developed software, as well as the means of optimizing the control of moving objects new methods, as well as the use of a new neural network structure to search for transformation functions, which made it possible to extend the scope of geometric control theory it breeds the preconditions for developing automatic train control systems and improves performance related to energy consumption.

The advanced diesel train model takes into account the main types of interaction between the train and the track profile, namely, turns, slopes, as well as the performance of the train engines, which adequately reflects the processes in real diesel train.

Specialized software has been created that has a graphical user interface and complies with software quality assessment requirements. This software implements an advanced structure of the human-machine system, makes it possible to perform automation of analytical transformations of geometric control theory to the form of Brunovsky. The new neural network structure is based on ART-type neural networks to solve multiple-choice tasks. This made it possible to develop a new method of finding transform functions that relate variables of nonlinear and linear models in the form of Brunovsky. To increase the efficiency of the linearization process, several methods have been proposed to simplify the calculation process by reducing the number of elements in the right-hand side of the initial differential equation system, and by separating the first equation, which itself is linear, from the general system of equations.

The performed research and development allowed to improve the structure of the on-board computer system of decision support of the driver of the diesel train, which allowed, under real conditions of movement of the dynamic object, during changes of road conditions, to perform recalculations and to give the driver new control laws which will allow to continue the movement on the route adhering to the timetable and minimum cost of fuel and energy resources.

Appropriate researches were conducted on real object and mathematical models. The results of the researches confirmed the correctness of the used tools, methods and

algorithms, on the basis of which the appropriate solutions that formed the basis of the developed software were proposed.

*Keywords:* geometric control theory, computer components, on-board computer system, linearization, mathematical model of a dynamic object, neural networks, searching of transformation functions, Brunovsky form.

*List of publications of the applicant.*

*Scientific works in which the main scientific results are published:*

1. *Hlavchev D.M.* Nejronnaya set`, raspoznayushhaya gruppy izobrazhenij / *V.D. Dmitrienko, S.Yu. Leonov, D.M. Hlavchev* / Vi`snik NTU “KhPI”. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2015, № 32 (1141). – S. 42 – 50.

2. *Hlavchev D.M.* Metod poiska funkczij preobrazovaniya, svyazy`vayushhikh peremenny`e nelinejny`kh i linejny`kh modelej v GTU / *V.D. Dmitrienko, A.Yu. Zakovorotny`j, D.M. Hlavchev* / Vi`snik NTU “KhPI”. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2016. – Vip. 44 (1216). – S. 14 – 30.

3. *Hlavchev D.M.* Linearizacziya matematicheskoy modeli, opisy`vayushhej processy` upravleniya podvizhnym sostavom, metodami differenczial`noj geometrii / *V.D. Dmitri`yenko, O.Yu. Zakovorotnij, N.V. Mezenczev, D.M. Hlavchev* // Vi`snik NTU “KhPI”. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2017. – Vip. 21 (1243). – S. 38 – 52.

4. *Hlavchev D.M.* Geometrical theory of control in the problems of minimizing the energy consumption for a traction electric drive / *V.D. Dmitrienko, A.Y. Zakovorotnij, V.I. Noskov, N.V. Mezentsev, D.M. Hlavchev, A.A. Kharchenko* / Vi`snik Donbas`koyi derzhavnoyi mashinobudi`vnoyi akademi`yi. – Kramators`k: DDMA, 2018. – № 41. – S. 3 – 16.

5. *Hlavchev D.M.* Issledovanie vozmozhnostej programmny`kh komponent bortovoj vy`chislitel`noj sistemy` pri preobrazovanii nelinejny`kh sistem k e`kvivalentny`m linejny`m / *V.D. Dmitri`yenko, A.Yu. Zakovorotny`j, M.V. Mezenczev, D.M. Hlavchev* // Vi`snik NTU “KhPI”. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2018. – № 24. – S. 80 – 98.

6. *Hlavchev D.M.* Issledovanie metoda poiska funkczij preobrazovaniya nelinejny`kh sistem k ekvivalentny`m linejny`m v geometricheskoj teorii upravleniya / *V.D. Dmitri`yenko, A.Yu. Zakovorotny`j, N.V. Mezenchev, D.M. Hlavchev* // *Vi`snik NTU "KhPI"*. – Kharki`v: NTU "KhPI", 2018. – № 42 (1318). – S. 20 – 35.

7. *Hlavchev D.M.* Programmnyaya komponenta dlya poiska reshenij sistemy` uravnenij v chastny`kh proizvodny`kh v GTU metodom gruppovogo uchyota argumentov / *V.D. Dmitri`yenko, O.Yu. Zakovorotnij, S.Yu. Leonov, D.M. Hlavchev* // *Vi`snik NTU "KhPI"*. – Kharki`v: NTU "KhPI", 2019. – № 13 (1338). – S. 61 – 72.

8. *Hlavchev D.M.* Programni` komponenti bortovoyi komp'yuternoyi sistemi dizel`-potyaga / *Hlavchev D. M.* / *Sistemi upravli`nnya, navi`gaczi`yi ta zv'yazku*, Poltava: PNTU, 2019, vipusk 5 (57). – C. 11 – 15.

9. *Hlavchev D.M.* Complex driver movement mathematical model of the tractive rolling stock / *V.D. Dmitrienko, A.Y. Zakovorotniy, V.I. Noskov, N.V. Mezentsev, D.M. Hlavchev, A.A. Kharchenko* / *Teka. commission of motorization and energetics in agriculture – 2018, vol. 18, no. 4, 21-30. Lublin, Poland.*

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

10. *Hlavchev D.M.* Programmnoe obespechenie dlya optimizaczii processov upravleniya dizel`-poezdom / *V.D. Dmitrienko, A.Yu. Zakovorotny`j, D.M. Hlavchev* / *Problemi i`nformatiki ta modelyuvannya: tezisi chotirnadczyatoyi mi`zhnar. nauk.-tekh. konf., Yalta, 22-28 veresnya 2014.* – Kharki`v: NTU "KhPI". – C. 39.

11. *Hlavchev D.M.* Programmnoe obespechenie dlya modelirovaniya dvizheniya dizel`-poezda / *V.D. Dmitrienko, A.Yu. Zakovorotny`j, D.M. Hlavchev* / *I`nformatika, upravli`nnya ta shtuchnij i`ntelekt. Tezisi naukovu-tekhni`chnoyi konferenczi`yi studenti`v, magi`stri`v ta aspi`ranti`v.* – Kharki`v: NTU "KhPI", 2014. – S. 24.

12. *Hlavchev D.M.* Programmnoe obespechenie dlya modelirovaniya dinamicheskogo ob`ekta / *V.D. Dmitrienko, A.Yu. Zakovorotny`j, D.M. Hlavchev* / *VIII uni`versitets`ka naukovu-praktichna students`ka konferenczi`ya magi`stranti`v.*

Інформаційні технології та інтелектуальна власність – NTU “KhPI”, 2014. – С. 140.

13. *Hlavchev D.M.* Rozrobka programno zabezpechennya dlya pìdtrimki priynyattya ri`shen` mashini`stom dizel`-potyaga seri`yi DEL-02 / *D.M. Hlavchev* / Vi`si`mnadczyata vseukrayins`ka (trinadczyata mi`zhnarodna) students`ka naukova konferenczi`ya z prikladnoyi matematiki ta i`nformatiki SNKPMI`-2015, L`vi`v: LNU i`m. Іvana Franka, 2015. – С. 113 – 114.

14. *Hlavchev D.M.* Programmnoe obespechenie dlya podderzhki prinyatiya reshenij mashinistom dizel`-poezda / *V.D. Dmitrienko, A.Yu. Zakovorotny`j, D.M. Hlavchev* / Tezi dopovi`di` XXIII Mi`zhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferenczi`yi “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я”. – Kharki`v: NTU “KhPI”, 2015. – С. 38.

15. *Hlavchev D.* Mathematical model of mechanical part of allocate electric engine in diesel-trains / *V. Dmitrienko, A. Zakovorotniy, D. Hlavchev* / Інформатика, управлìння та штучний інтелект / Materi`ali drugoyi naukovo-tekhni`chnoyi konferenczi`yi studenti`v, magi`stri`v ta aspi`ranti`v. – Kharki`v: NTU “KhPI”, 2016. – С. 26.

16. *Hlavchev D.M.* Nejrorny`e seti dlya realizaczii mnogomerny`kh assocziaczij / *V.D. Dmitrienko, S.Yu. Leonov, S.A. Graborov, D.M. Hlavchev* // Tezi dopovi`di` XXIV Mi`zhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferenczi`yi “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я”. – Kharki`v: NTU “KhPI”, 2016. – С. 130.

17. *Hlavchev D.M.* Bortovaya komp`yuternaya sistema podderzhki prinyatiya reshenij mashinistom dizel`-poezda / *D.M. Hlavchev* / 20-j Yuvi`lejnij Mi`zhnarodnij molodi`zhnij forum “Radi`oelektroni`ka ta molod` u XXI` stoli`tti”. Zb. Materi`ali`v forumu. T.7. – Kharki`v: KhNURE. 2016. – С. 66 – 67.

18. *Hlavchev D.M.* Metod i programmnoe obespechenie dlya poiska funkczij preobrazovaniya, svyazy`vayushhikh peremenny`e linejny`kh i nelinejny`kh modelej v GTU / *V.D. Dmitrienko, A.Yu. Zakovorotny`j, D.M. Hlavchev* / Інформатика,

upravli`nnya ta shtuchnij i`ntelegt. Tezisi naukovo-tekhni`chnoyi konferenci`yi studenti`v, magi`stri`v ta aspi`ranti`v. – Kharki`v: NTU “KhPI”, 2017. – C. 41.

19. *Hlavchev D.M.* Metod opredeleniya funkczij preobrazovaniya geometricheskoj teorii upravleniya, svyazy`vayushhikh peremenny`e linejny`kh i nelinejny`kh modelej / *V.D. Dmitri`yenko, N.V. Mezenczev, D.M. Hlavchev* / T`nformaczi`jni` tekhnologi`yi: nauka, tekhnika, tekhnologi`ya, osvita, zdorov'ya. Tezi dopovi`dej XXI mi`zhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferenci`yi MicroCAD 2017. 17-18 travnya 2017r.: u 4 ch. Ch. IV / za red. prof. Sokola S.G. – Kharki`v, NTU “KhPI”, – S. 79.

20. *Hlavchev D.M.* Intellektual`naya sistema podderzhki prinyatiya reshenij operatorom dlya upravleniya tekhnologicheskimi processami / *V.D. Dmitri`yenko, S.Yu. Leonov, D.M. Hlavchev* / Materi`ali XVII mi`zhnar. nauk.-tehn. konferenci`yi “Vimi`ryuval`na ta obchislyuval`na tekhnika v tekhnologicheskikh procesakh”. Odes. Nacz. akad. zv'yazku i`m. O.S. Popova. – Odessa – Khmel`nicz`kij: KhNU, 2017. – S. 97.

21. *Hlavchev D.M.* Voprosy` poiska funkczij preobrazovaniya, svyazy`vayushhie peremenny`e linejnoy i nelinejnoy modeli v geometricheskoj teorii upravleniya / *V.D. Dmitri`yenko, A.Yu. Zakovorotny`j, N.V. Mezenczev, D.M. Hlavchev* / Tezi KhVII Mi`zhnarodnoyi naukovo-tekhni`chnoyi konferenci`yi “Problemi i`nformatiki ta modelyuvannya”. – Kharki`v: NTU “KhPI”, 2017 (Kharki`v – Odessa) – C. 28.

22. *Hlavchev D.M.* Razrabotka programnogo obespecheniya dlya linearizaczi matematicheskikh modelej v geometricheskoj teorii upravleniya / *V.D. Dmitri`yenko, A.Yu. Zakovorotny`j, N.V. Mezenczev, D.M. Hlavchev* / Tezi dopovi`di` XXVI Mi`zhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferenci`yi “T`nformaczi`jni` tekhnologi`yi: nauka, tekhnika, tekhnologi`ya, osvita, zdorov'ya”. – Kharki`v: NTU “KhPI”, 2018. – S. 173.

23. *Hlavchev D.M.* Problemy` preobrazovaniya nelinejny`j sistem upravleniya tekhnologicheskimi processami k e`kvivalentny`m linejny`m v forme Brunovskogo / *V.D. Dmitri`yenko, S.Yu. Leonov, A.Yu. Zakovorotny`j, D.M. Hlavchev*

/ Materi`ali XVIII` mi`zhnar. nauk.-tekh. konferenczi`yi “Vimi`ryuval`na ta obchislyuval`na tekhnika v tekhnologi`chnikh procesakh”. – Odes. Nacz. akad. zv'yazku i`m. O.S. Popova. – Odesa, 2018. – S. 25 – 26.

24. *Hlavchev D.M.* Vozmozhnosti programmny`kh komponent bortovoj vy`chislitel`noj sistemy` pri preobrazovanii nelinejny`kh sistem k e`kvivalentny`m linejny`m / *V.D. Dmitri`yenko, A.Yu. Zakovorotny`j, D.M. Hlavchev* / Tezi XVIII Mi`zhnarodnoyi naukovo-tekhni`chnoyi konferenczi`yi “Problemi i`nformatiki ta modelyuvannya”. – Kharki`v: NTU “KhPI”, 2018 (Kharki`v – Odessa). – S. 6.

25. *Hlavchev D.M.* Vozmozhnosti nejronny`kh setej dlya postroeniya bazy`znaniy v programmny`kh komponentakh bortovoj vy`chislitel`noj sistemy` / *V.D. Dmitri`yenko, A.Yu. Zakovorotny`j, D.M. Hlavchev* / I`nformatika, upravli`nnya ta shtuchnij i`ntelegt. Materi`ali p'yatoyi mi`zhnarodnoyi naukovo-tekhni`chnoyi konferenczi`yi studenti`v, magi`stri`v ta aspi`ranti`v. – Kharki`v: NTU “KhPI”, 2018. – 116 s.

26. *Hlavchev D.M.* Nejronna merezha dlya poshuku funkczij peretvorenniya, shho povyazuyut` zmi`nni` li`ni`jnikh i` neli`ni`jnikh modelej v GTU / *V.D. Dmitri`yenko, O.Yu. Zakovorotnij, S.Yu. Leonov, Hlavchev D.M.* / Materi`ali XIX mi`zhnar. nauk.-tekh. konferenczi`yi “Vimi`ryuval`na ta obchislyuval`na tekhnika v tekhnologi`chnikh procesakh”. – Odesa, 2019. – S. 40 – 42.

27. *Hlavchev D.M.* Poisk reshenij sistemy` uravnenij v chastny`kh proizvodny`kh metodom gruppovogo ucheta argumentov / *V.D. Dmitri`yenko, O.Yu. Zakovorotnij, S.Yu. Leonov, D.M. Hlavchev* / Tezi KhI`Kh Mi`zhnarodnoyi naukovo-tekhni`chnoyi konferenczi`yi “Problemi i`nformatiki ta modelyuvannya”. – Kharki`v: NTU “KhPI”, 2019 (Kharki`v – Odessa). – S. 10.

*Published works that further reflect the scientific results:*

28. *Hlavchev D.M.* Komp'yuterna programa dlya lyudino-mashinnoyi sistemi, shho avtomatizuye anali`tichni` peretvorenniya geometrichnoyi teori`yi keruvannya / *V.D. Dmitri`yenko, A.Yu. Zakovorotny`j, D.M. Hlavchev* / Svi`docztvo pro

reyestraczi`yu avtors`kogo prava na tvi`r № 74937. Zareyestr. v Derzh. sluzhbi` i`ntelektual`noyi vlasnosti` Ukrayini 23.11.2017. Avtors`ke svi`dotstvo.

29. *Hlavchev D.M.* Komp'yuterna programa “Programnij kompleks dlya bortovoyi rozrakhunkovoyi sistemi” / *D.M. Hlavchev* / Svi`docztvo pro reyestraczi`yu avtors`kogo prava na tvi`r № 79771. Zareyestr. v Derzh. sluzhbi` i`ntelektual`noyi vlasnosti` Ukrayini 13.06.2018. Avtors`ke svi`dotstvo.

## ЗМІСТ

|   |           |
|---|-----------|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....  | 5         |
| ВСТУП.....  | 6         |
| <b>РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ТЯГОВИМ РУХОМИМ СКЛАДОМ.....</b>             | <b>15</b> |
| 1.1. Бортові комп'ютерні системи тягового рухомого складу.....  | 15        |
| 1.1.1. Комп'ютерна СУ потягами у Пекінському метро .....  | 15        |
| 1.1.2. Аналіз багатоагентної СУ потягами для Індійських залізниць.....  | 16        |
| 1.1.3. Огляд багатоагентної СУ потягами типу “Сапсан” .....   | 17        |
| 1.1.4. Комп'ютерна система російського потяга “Сокіл” .....   | 18        |
| 1.1.5. Аналіз бортових КС на залізничних дорогах Німеччини .....  | 19        |
| 1.1.6. Мікропроцесорна СУ та діагностики “МСУД” .....   | 21        |
| 1.1.7. КС автоматичного управління “Пілот”.....   | 22        |
| 1.1.8. Огляд універсальної КС автоматичного ведення потяга .....  | 22        |
| 1.1.9. Універсальна КСУ українським дизель-потягом.....   | 23        |
| 1.1.10. Аналіз СППРМ потяга.....  | 25        |
| 1.2. Математична модель дизель-потяга .....   | 28        |
| 1.3. Аналіз відомого методу пошуку функцій перетворення, що пов'язують змінні лінійних і нелінійних моделей .....   | 37        |
| 1.4. Використання нейромережевої асоціативної пам'яті в СУ .....  | 39        |
| 1.5. Аналіз методів синтезу оптимальних систем управління.....  | 42        |
| 1.6. Висновки.....  | 47        |
| <b>РОЗДІЛ 2 РОЗШИРЕННЯ ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТЕОРІЇ УПРАВЛІННЯ .....</b>  | <b>51</b> |
| 2.1. Перетворення нелінійних систем до лінійного виду з різною кількістю однокленів в правих частинах звичайних диференціальних рівнянь початкового об'єкту ..... | 52        |
| 2.2. Спрощення процесу лінеаризації за рахунок відокремлення лінійного рівняння від цілої системи .....   | 66        |
| 2.3. Перетворення розширеної нелінійної системи з двома двигунами до лінійного виду у формі Бруновського.....   | 72        |



|   |            |
|---|------------|
| 2.4. Перевірка результатів лінеаризації шляхом порівняння нелінійної та лінійної моделей у формі Бруновського .....     | 80         |
| 2.5. Висновки .....   | 90         |
| <b>РОЗДІЛ 3 НОВИЙ МЕТОД ПОШУКУ ФУНКЦІЙ ПЕРЕТВОРЕННЯ В ГТУ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ .....</b>                           | <b>92</b>  |
| 3.1. Розробка нейронної мережі для пошуку функцій перетворень .....   | 92         |
| 3.1.1. Приклад 3.1 використання НМ для пошуку ФП.....   | 97         |
| 3.1.2. Приклад 3.2 використання НМ для пошуку ФП.....   | 104        |
| 3.1.3. Визначення змінних лінійної моделі в формі Бруновського через змінні початкової нелінійної моделі .....          | 111        |
| 3.3. Висновки .....   | 113        |
| <b>РОЗДІЛ 4 ПРОГРАМНІ КОМПОНЕНТИ БОРТОВОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ, ЩО РОЗШИРЮЮТЬ ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ГТУ.....</b>         | <b>115</b> |
| 4.1. Нові функціональні можливості ПЗ бортової комп'ютерної системи для рішення задач управління за допомогою ГТУ ..... | 115        |
| 4.2. Структура функціональних блоків програмного забезпечення .....   | 116        |
| 4.3. Розробка інтерфейсу, що розширює можливості ПЗ .....   | 118        |
| 4.4. Модулі ПЗ, що відповідають за перетворення даних.....  | 123        |
| 4.4.1. Організація внутрішніх процесів розрахункового блоку.....  | 123        |
| 4.4.2. Розрахунковий програмний компонент .....   | 126        |
| 4.4.3. Блок завантаження даних, що керує розрахунковим блоком.....  | 126        |
| 4.5. Надійність програмного забезпечення.....   | 127        |
| 4.6. Додаткові модулі ПЗ .....  | 128        |
| 4.6.1. Компонент утиліт .....   | 128        |
| 4.6.2. Блок роботи з файловою системою .....  | 129        |
| 4.7. Рішення задач управління за допомогою ГТУ .....  | 130        |
| 4.7.1. Блок нейронної мережі пошуку функцій перетворення .....  | 130        |
| 4.7.2. Блок пошуку оптимального режиму руху по маршруту.....  | 132        |
| 4.8. Оцінка якості програмного забезпечення.....  | 134        |
| 4.9. Приклад роботи програмного забезпечення .....  | 137        |
| 4.10. Рішення завдання оптимального руху дизель-потягу по повному маршруту прямування .....                             | 143        |

|  |     |
|--|-----|
| 4.10.1. Моделювання процесу руху потяга по маршруту Харків – Козача Лопань .....   | 146 |
| 4.10.2. Моделювання процесу руху потяга по маршруту Козача Лопань – Харків .....   | 149 |
| 4.10.3. Порівняння даних моделювання з графіком руху реального приміського потяга.....   | 154 |
| 4.10.4. Спроба підвищення ефективності руху, за рахунок оптимізації окремих множин перегонів з урахуванням особливостей маршруту ..... | 155 |
| 4.11. Висновки .....   | 159 |
| ВИСНОВКИ.....  | 161 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....   | 164 |
| ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ .....  | 181 |
| ДОДАТОК Б ТЕКСТ ПРОГРАМИ ГОЛОВНОГО ПРОГРАМНОГО КОМПОНЕНТУ ДЛЯ ЛІНЕАРИЗАЦІЇ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ .....                                  | 186 |
| ДОДАТОК В АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ .....   | 226 |
| ДОДАТОК Г ОПИС БЛОКІВ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ МАШИНІСТА .....                                      | 231 |
| ДОДАТОК Д КЕРІВНИЦТВО КОРИСТУВАЧА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ЛІНЕАРИЗАЦІЇ СИСТЕМИ РІВНЯНЬ.....                                       | 245 |
| ДОДАТОК Е ВИХІДНІ ДАНІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІСЛЯ ВИКОНАННЯ ПРОЦЕСУ ЛІНЕАРИЗАЦІЇ.....  | 249 |
| ДОДАТОК Ж АВТОРСЬКІ СВДОТСТВА НА ПРОГРАМНИЙ КОД .....  | 257 |