

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

Заковоротний Олександр Юрійович



УДК 681.5.015.24:629.424

**СИНТЕЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РУХОМИМ
СКЛАДОМ НА ОСНОВІ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТЕОРІЇ КЕРУВАННЯ ТА
НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі обчислювальної техніки та програмування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Дмитрієнко Валерій Дмитрович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри обчислювальної техніки та
програмування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кузнецов Борис Іванович,
Інститут технічних проблем магнетизму
Національної академії наук України, м. Харків,
завідувач відділу проблем управління магнітним полем

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Юрченко Олег Миколайович,
Інститут електродинаміки Національної академії
наук України, м. Київ, завідувач відділу транзисторних
перетворювачів

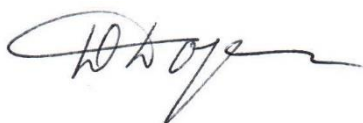
доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Суздаль Віктор Семенович,
Інститут сцинтиляційних матеріалів
Національної академії наук України, м. Харків,
завідувач відділу технології вирощування
монокристалів

Захист відбудеться «18» травня 2017 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «03» квітня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Дорофєєв Ю.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Необхідність оновлення тягового рухомого складу Укрзалізниці призвела до розробки вітчизняних дизель-поїздів серії ДЕЛ-02 з унікальним для України тяговим асинхронним електроприводом. Створені дизель-поїзди обладнані бортовою комп'ютерною інформаційно-вимірювальною системою, яка відкрила можливості для впровадження на її основі перших вітчизняних систем підтримки прийняття рішень машиністом (СППРМ). Впровадження цих систем дозволить без істотних фінансових витрат на їх розробку раціонально використовувати наявні паливно-енергетичні ресурси Укрзалізниці та підвищити швидкості руху рухомого складу з наявних 100 – 120 км/год до швидкостей понад 140 км/год на тих ділянках шляху, де це дозволить якість залізничних колій. Для створення подібних систем доцільним є розробка узагальнених математичних моделей, що описують об'єкт керування як багатомасову систему з ширшим спектром динамічних процесів 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.

Для синтезу законів керування рухомим складом використовуються різні методи оптимізації. Одним з таких методів є сучасна геометрична теорія керування (ГТК), яка дозволяє синтезувати закони керування для складних нелінійних об'єктів в режимі реального часу. Однак трудомісткі аналітичні обчислення ГТК та труднощі визначення перетворень, що пов'язують змінні лінійних і нелінійних моделей, ускладнюють застосування ГТК для пошуку оптимальних керувань рухомим складом в режимі реального часу. Тому доцільним є розробка спеціалізованого програмного забезпечення, що розширює область застосування ГТК 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 СППРМ, 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.

Таким чином, розробка СППРМ, яка створює теоретичну передумову синтезу автоматичних систем керування швидкісним рухомим складом і дозволяє поліпшити його енергетичні характеристики, є актуальною науково-прикладною проблемою, яка потребує подальшого дослідження та склала основу дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі обчислювальної техніки та програмування НТУ «ХПІ» згідно плану держбюджетних НДР МОН України: «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-виміральної 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.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка системи підтримки прийняття рішень машиністом для автоматизованої системи управління дизель-поїзда, яка на основі узагальненої математичної моделі, геометричної теорії керування та нейронних мереж дозволяє поліпшити енергетичні характеристики тягового рухомого складу.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

- виконати аналіз існуючих систем керування та підтримки прийняття рішень, що застосовуються на залізничному транспорті, математичних моделей руху дизель-поїзда, а також методів теорії оптимального керування;

- розробити узагальнену математичну модель руху дизель-поїзда, яка враховує основні види коливань вагонів та сили, що виникають при їх взаємодії під час руху, буксування та паралельну роботу двигунів обмоторених вагонів, що дозволяє провести дослідження щодо впливу коливань вагонів на процес руху та витрати енергії рухомим складом, а також протестувати закони керування;

- створити програмне забезпечення людино-машинної системи, яке дозволить автоматизувати складні аналітичні перетворення ГТК;

- розробити метод пошуку функцій перетворення між змінними нелінійних і лінійних моделей у формі Бруновського для використання ГТК;

- синтезувати закони оптимального керування тяговим рухомим складом, що дозволяють організувати рух згідно графіку за умови мінімальної витрати паливно-енергетичних ресурсів;

- розробити СППРМ на основі узагальнених математичних моделей руху дизель-поїзда, спеціалізованого програмного забезпечення, нейромережових баз даних та знань, що дозволить у реальних умовах швидкісного руху видавати машиністу закони керування, які поліпшують енергетичні характеристики рухомого складу;

- реалізувати для бортової СППРМ базу даних, що здійснює компактне зберігання інформації, яка необхідна машиністу для керування рухомим складом, удосконалену базу знань, котра здійснює накопичення поточних даних в процесі функціонування СППРМ, систему діагностики асинхронних двигунів та систему прогнозування та боротьби з буксуванням колісних пар;

- провести експериментальні дослідження розроблених методів та алгоритмів на математичних моделях і реальному об'єкті.

Об'єкт дослідження – процеси керування тяговим рухомим складом.

Предмет дослідження – система керування дизель-поїздом.

Методи дослідження. Теоретичною базою виконаних досліджень є фундаментальні положення теорії тяги поїздів та тягового електроприводу при синтезі моделей дизель-поїзда; методи геометричної теорії керування при синтезі законів оптимального керування; методи теорії програмування при створенні спеціалізованого програмного забезпечення; методи математичного моделювання при дослідженнях розроблених моделей та систем; методи штучного інтелекту та нейронних мереж при розробці складових бортової СППРМ.

Наукова новизна одержаних результатів:

– 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 виляння 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 математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення, яке дозволяє автоматизувати аналітичні перетворення ГТК 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 ГТК з об'єктів, які описуються 5-6 диференціальними рівняннями на об'єкти, котрі описуються системами звичайних диференціальних рівнянь, що містять десятки рівнянь;

– вперше автоматизовано пошук функцій перетворення між змінними нелінійних і лінійних моделей на основі нейронних мереж, які здатні визначати декілька рішень, що дозволяє спростити пошук цих функцій ГТК;

– вперше запропоновано застосовувати ГТК 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 (ДАП), 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 СППРМ 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 СППРМ для автоматизації процесів керування;

– одержали подальший розвиток архітектури й алгоритми функціонування мереж Хеммінга та безперервних нейронних мереж адаптивної резонансної теорії (АРТ), 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;

– одержала подальший розвиток база знань СППРМ, котра, на відміну від існуючих баз знань, які здатні запам'ятовувати лише пари асоціативних зображень, дає можливість вхідним зображенням ставити у відповідність одну або більшу кількість асоціацій та вирішувати завдання з декількома рішеннями, що дозволяє збільшити її гнучкість та надає можливість зберігати у її пам'яті декілька рівноцінних рішень про закон керування рухомим складом для кожного перегону;

– одержала подальший розвиток бортова СППРМ, що на основі узагальнених математичних моделей об'єкта керування, спеціалізованого програмного забезпечення та нейромережевих баз даних, баз знань та системи діагностики дозволяє в реальних умовах швидкісного руху й зміни дорожньої обстановки видавати машиністу закони керування рухомим складом, при застосуванні яких виконується графік руху, мінімізується витрата паливно-енергетичних ресурсів та підтримуються комфортні умови для пасажирів.

Практичне значення одержаних результатів для синтезу автоматизованої системи управління рухомим складом:

– створено програмне забезпечення, що дозволяє автоматизувати аналітичні перетворення ГТК 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 СППРМ;

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

– створено програмне забезпечення, що реалізує складові бортової СППРМ: 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 СППРМ, які можуть донавчатися й визначати декілька рішень.

Результати роботи впроваджені:

– 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;

– 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»;

– у навчальному процесі НТУ «ХПІ» 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».

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Серед них – модель руху колісної пари вагону; модель паралельної роботи двигунів; нелінійна та лінійна моделі руху поїзда; архітектура, алгоритм та підпрограма, що реалізують систему прогнозування буксування; алгоритми, що розширюють можливості ГТК при синтезі оптимальних законів керування; метод нейромережевого пошуку функцій перетворення; програмне забезпечення, що реалізує людино-машинну систему та дозволяє автоматизувати аналітичні перетворення ГТК; архітектура, алгоритми і підпрограма, що реалізує безперервну нейронну мережу АРТ, яка може вирішувати завдання з декількома рішеннями; архітектури, алгоритми і підпрограми, які реалізують стабільно-пластичні нейронні мережі Хеммінга, Хебба та мережі на основі перцептрона та нейронну мережу Хеммінга, що здатна визначати декілька рішень; структура та програмна реалізація СППРМ; архітектури, алгоритми і підпрограми, які реалізують два види дискретної нейромережевої асоціативної пам'яті: N -направлену та багатошарову асоціативну пам'ять з керуючими нейронами; архітектура, алгоритми і підпрограма нейромережевої системи діагностики двигунів поїзда.

Апробація результатів дисертації. Основні результати та положення роботи доповідалися та обговорювалися 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).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено 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.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 433 сторінки, серед них: 25 рисунків на 24 окремих сторінках, 25 рисунків за текстом, 7 таблиць на 6 окремих сторінках, список з 274 найменувань використаних джерел на 33 сторінках, 6 додатків на 75 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині обґрунтовані актуальність, теоретична і практична значимість обраної теми, сформульовані мета й основні задачі досліджень та результати, що виносяться на захист, позначена наукова новизна отриманих результатів та їх практична цінність, зазначено зв'язок роботи з науковими планами та темами, її апробація та публікації за темою.

У першому розділі проаналізована узагальнена структура системи керування перших українських дизель-поїздів серії ДЕЛ-02 з вітчизняними асинхронними електроприводами та бортовою комп'ютерною інформаційно-вимірювальною системою.

Проаналізовані математичні моделі руху дизель-поїзда, які раніше використовувались при його створенні та впровадженні, і завдяки яким розробникам вдалось вирішити ряд завдань оптимального керування поїздом на швидкостях до 120 км/год. Однак, занадто спрощений опис дизель-поїзда, що представляє його як одномасову систему з одним еквівалентним електроприводом, не дозволив дослідити цілий ряд процесів, які відбуваються у в ньому під час руху і впливають на комфорт пасажирів, зношеність колісних пар та енергетичні витрати. До таких процесів відносяться повздовжні коливання вагонів та сили, що виникають при їх взаємодії під час руху, які особливо проявляються на швидкостях понад 140 км/год та впливають на комфорт пасажирів, а також бічне відхилення та виляння вагонів.

Зроблено висновок про доцільність розробки узагальнених математичних моделей руху дизель-поїзда, які враховують, з одного боку, паралельну роботу двигунів, що необхідно для дослідження процесів буксування, а з іншого боку, основні види коливань вагонів й сили, які виникають між ними в процесі взаємодії, що необхідно для синтезу законів оптимального керування. Виконано аналіз існуючих бортових систем керування та підтримки прийняття рішень, які дотепер застосовуються на залізничному транспорті. Відзначено, що в більшості цих систем питання, пов'язані з пошуком оптимальних законів керування, багато в чому не вирішені. Проаналізовані класичні і сучасні методи синтезу систем оптимального керування. Зроблено висновок, що виходячи з особливостей об'єкту та характеристик методів оптимізації, найбільш доцільним для оптимізації динаміки руху дизель-поїзда є методи геометричної теорії керування та штучних нейронних мереж.

У другому розділі наведені основні проблеми, які виникають при розробці узагальненої математичної моделі руху дизель-поїзда та перераховані основні процеси, що потребують врахування.

Розроблено математичну модель руху дизель-поїзда, яка дозволяє досліджувати бічне відхилення та виляння вагону під час руху поїзда по нерівним ділянкам колії. По результатам досліджень зроблено висновки про адекватність розробленої моделі та доцільність її використання в узагальненій моделі руху дизель-поїзда для опису коливань необмотореного вагону. Це пов'язано з тим, що саме цей вагон у більшій мірі схильний до таких видів коливань як бічне відхилення та виляння.

Для дослідження паралельної роботи двигунів в режимі тяги та в режимі переходу від тяги до буксування розроблено модель руху дизель-поїзда, що включає в себе два двигуна одного з обмоторених вагонів. Запропонована модель враховує, що двигуни не є абсолютно однаковими, тобто так, як це є на реальному поїзді. Проведені дослідження показали, що під час руху виникає різниця між частотами обертання роторів відповідних двигунів, яка за своїм абсолютним значенням зростає зі збільшенням швидкості руху, а значне збільшення величини цієї різниці свідчить про виникнення пробуксовки колісних пар. Тому для визначення моментів виникнення буксування необхідно здійснювати порівняння поточного значення різниці частот відповідних двигунів з постійною складовою цієї різниці, так як в моменти буксування поточна різниця частот значно перевищує постійну складову цієї різниці. Розроблено нейромережеву структуру, що складається з двох паралельно працюючих нейронних мереж на основі багатозарового перцептрона, яка дозволяє прогнозувати буксування колісних пар в процесі руху поїзда на основі зміни сигналу різниці частот обертання роторів відповідних двигунів. На реальних даних, отриманих на дизель-поїзді ДЕЛ-02, виконано процес навчання і тестування розробленої мережі. Із застосуванням цієї мережі для СППРМ реалізовано блок прогнозування та боротьби з буксуванням колісних пар.

Розроблено узагальнену математичну модель руху дизель-поїзда, що складається з трьох вагонів й враховує основні види їх коливань та сили взаємодії, а також паралельну роботу тягових асинхронних двигунів:

$$\begin{aligned}
\frac{dS}{dt} &= k_1 V_1; & \frac{d\Psi_{\alpha 1}^q}{dt} &= b_1^q U_{\alpha}^q - a_s^q \Psi_{\alpha 1}^q + a_s^q k_r^q \Psi_{\alpha 2}^q, & \frac{d\Psi_{\beta 1}^q}{dt} &= b_2^q U_{\beta}^q - a_s^q \Psi_{\beta 1}^q + a_s^q k_r^q \Psi_{\beta 2}^q, \\
\frac{d\omega^q}{dt} &= \frac{p}{J^q} \left(\frac{3}{2} p \frac{k_r^q}{\sigma^q L_s^q R^q} i_p (\Psi_{\alpha 2}^q \Psi_{\beta 1}^q - \Psi_{\alpha 1}^q \Psi_{\beta 2}^q) - a_0 - a_1 \omega^q - a_2 (\omega^q)^2 - i(S) - \omega_r(S) + \eta_{\delta}^q(t) \right), \\
\frac{d\Psi_{\alpha 2}^q}{dt} &= -a_r^q \Psi_{\alpha 2}^q + a_r^q k_s^q \Psi_{\alpha 1}^q - \omega^q \Psi_{\beta 2}^q, & \frac{d\Psi_{\beta 2}^q}{dt} &= -a_r^q \Psi_{\beta 2}^q + a_r^q k_s^q \Psi_{\beta 1}^q - \omega^q \Psi_{\alpha 2}^q, & q &= \overline{1, 3}; \\
\frac{dV_1}{dt} &= \frac{1}{m_m} \left(\sum_{q=1}^2 \frac{3}{2} p \frac{k_r^q}{\sigma^q L_s^q R^q} i (\Psi_{\alpha 2}^q \Psi_{\beta 1}^q - \Psi_{\alpha 1}^q \Psi_{\beta 2}^q) - F_{12} - F_{c1} \right); & & & & (1) \\
\frac{dV_2}{dt} &= \frac{1}{m_{\Pi}} (F_{12} - F_{23} - F_{c2}); & \frac{dV_3}{dt} &= \frac{1}{m_m} \left(\frac{3}{2} p \frac{k_r^3}{\sigma^3 L_s^3 R^3} i (\Psi_{\alpha 2}^3 \Psi_{\beta 1}^3 - \Psi_{\alpha 1}^3 \Psi_{\beta 2}^3) + F_{23} - F_{c3} \right); \\
\frac{dF_{12}}{dt} &= C_{12} (V_1 - V_2); & \frac{dF_{23}}{dt} &= C_{23} (V_2 - V_3); \\
\frac{dQ}{dt} &= g_1; & \frac{dg_1}{dt} &= -\frac{2K}{m_{\text{кп}}} \cdot \frac{1}{V_2} g_1 - \frac{2K}{m_{\text{кп}}} \varphi - \frac{2C_y}{m_{\text{кп}}} Q; \\
\frac{d\varphi}{dt} &= g_2; & \frac{dg_2}{dt} &= -\frac{2Kl^2}{J_{\text{кп}}} \cdot \frac{1}{V_2} g_2 + \frac{2Klh_{\text{к}}}{J_{\text{кп}} R^4} Q - \frac{2C_x l^2}{J_{\text{кп}}} \varphi,
\end{aligned}$$

де S – відстань, яку проходить дизель-поїзд; t – час; k_1 , b_1^q , b_2^q , $a_s^q = 1/\sigma^q T_s^q$, $k_r^q = L_m^q/L_r^q$, $a_r^q = 1/\sigma^q T_r^q$, $k_s^q = L_m^q/L_s^q$, $\sigma^q = 1 - k_r^q k_s^q$, $T_s^q = L_s^q/r_1^q$, $T_r^q = L_r^q/r_2^q$, L_r^q , L_m^q , L_s^q , r_1^q , r_2^q ($q = \overline{1, 3}$) – постійні коефіцієнти, які враховують параметри двигунів обмоторених вагонів; q – кількість двигунів; $\Psi_{\alpha 1}^q$, $\Psi_{\beta 1}^q$ ($q = \overline{1, 3}$) – проекції на осі α і β потокозчеплень статорів еквівалентних двигунів, відповідно, двох реальних двигунів першого обмотореного вагона й одного еквівалентного приводу другого обмотореного вагона; U_{α}^q , U_{β}^q ($q = \overline{1, 3}$) – проекції на осі α і β напруги обмоток статорів еквівалентних двигунів, відповідно, двох реальних двигунів першого обмотореного вагона й одного еквівалентного приводу другого обмотореного вагона; ω^q ($q = \overline{1, 3}$) – кутові швидкості обертання роторів двигунів, відповідно, двох реальних двигунів першого обмотореного вагона й одного еквівалентного приводу другого обмотореного вагона; p – число пар полюсів статора у кожного двигуна; J^q ($q = \overline{1, 3}$) – момент інерції двигуна та механізму, приведений до валу, відповідно, двох реальних двигунів першого обмотореного вагона й одного еквівалентного приводу другого обмотореного вагона; i_p – передавальне число редуктора; R^q ($q = \overline{1, 3}$) – радіуси, відповідно, двох колісних пар першого вагона і однієї колісної пари третього вагона; a_0 , a_1 , a_2 – постійні коефіцієнти, що характеризують момент навантаження; $i(S)$ – функція опору від ухилів профілю колії; $\omega_r(S)$ – функція опору від кривих профілю колії;

$\eta_{\delta}^q(t)$ ($q=1, 2$) – випадкова функція для імітації можливості виникнення буксування, $\eta_{\delta}^3(t) = 0$; $\Psi_{\alpha 2}^q, \Psi_{\beta 2}^q$ ($q=\overline{1, 3}$) – проекції на осі α і β потокозчеплень ротора еквівалентних двигунів, відповідно, двох реальних двигунів першого обмотореного вагона й одного еквівалентного приводу другого обмотореного вагона; V_1, V_2, V_3 – швидкості руху першого, другого й третього вагонів дизель-поїзда; m_m, m_{Π} – маса обмотореного та пасажирського вагонів; F_{12}, F_{23} – сили, що діють між першим і другим, та другим і третім вагонами; F_{c1}, F_{c2}, F_{c3} – сила опору руху першого, другого та третього вагонів; C_{12}, C_{23} – коефіцієнти пружності між першим і другим, та другим і третім вагонами; Q – величина бічного відхилення другого вагона; g_1, g_2 – проміжні змінні; K – коефіцієнт кріпа; $m_{\text{кп}}$ – маса колісної пари другого вагона; φ – кут виляння другого вагона; C_y, C_x – жорсткість поперечних та поздовжніх зв'язків; l – половина відстані між колесами на колісній парі другого вагона; $J_{\text{кп}}$ – момент інерції колісної пари другого вагона щодо вертикальної вісі; h_k – конусність колеса другого вагона; R^4 – радіус колеса другого вагона.

На розробленій моделі (1) при відповідних початкових умовах проведені дослідження щодо впливу основних видів коливань вагонів на процес руху й витрати енергії під час швидкісного руху дизель-поїзда по нерівним ділянкам колії (рис. 1). На рис. 1, *а*, представлені графіки зміни в часі позицій тягового ($N_{\text{км}}$) й гальмівного ($N_{\text{ткм}}$) контролерів машиніста, миттєвих значень швидкості руху першого, другого і третього вагонів поїзда (V_1, V_2, V_3), пройденого шляху (S), а також енергії (E), яку споживає дизель-поїзд між двома станціями. На рис. 1, *б*, приведена зміна відстані між першим і другим (dS_{12}) та другим і третім (dS_{23}) вагонами поїзда. На рис. 1, *в*, представлені графіки зміни у часі сил, що діють між першим і другим (F_{12}), та другим і третім вагонами (F_{23}) під час руху поїзда по нерівним ділянкам шляху між двома станціями.

Якісна та кількісна оцінка отриманих результатів показала, що такі види коливань необмотореного вагону як бічне відхилення, виляння та посмикування несуттєво впливають на загальну кількість витраченої енергії поїздом (перевитрата енергії не перевищує 4 %). У зв'язку з цим запропоновано проводити пошук законів оптимального керування рухом дизель-поїзда без урахування цих видів коливань необмотореного вагона.

У третьому розділі в результаті аналізу досвіду використання ГТК для синтезу регуляторів нелінійними об'єктами встановлено, що область застосування ГТК обмежена об'єктами, які описуються системами звичайних нелінійних диференціальних рівнянь не вище 5-6 порядку. Це пов'язано з великим обсягом аналітичних обчислень, трудомісткістю перевірки умов інволютивності та необхідністю пошуку функцій переходу між змінними нелінійної моделі і моделей у формі Бруновського. Для подолання цих обмежень розроблено людино-машинну систему (рис. 2), що автоматизує трудомісткі обчислення ГТК.

$V_1, V_2, V_3, \text{км/ч}; N_{\text{KM}}, N_{\text{TKM}} \times 0.1; S \times 50, \text{м}; E, \text{МДж}$

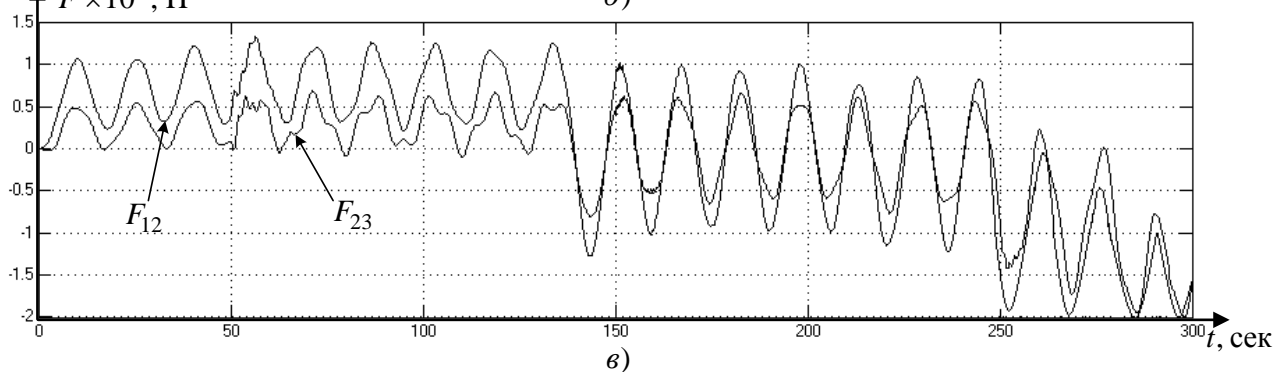
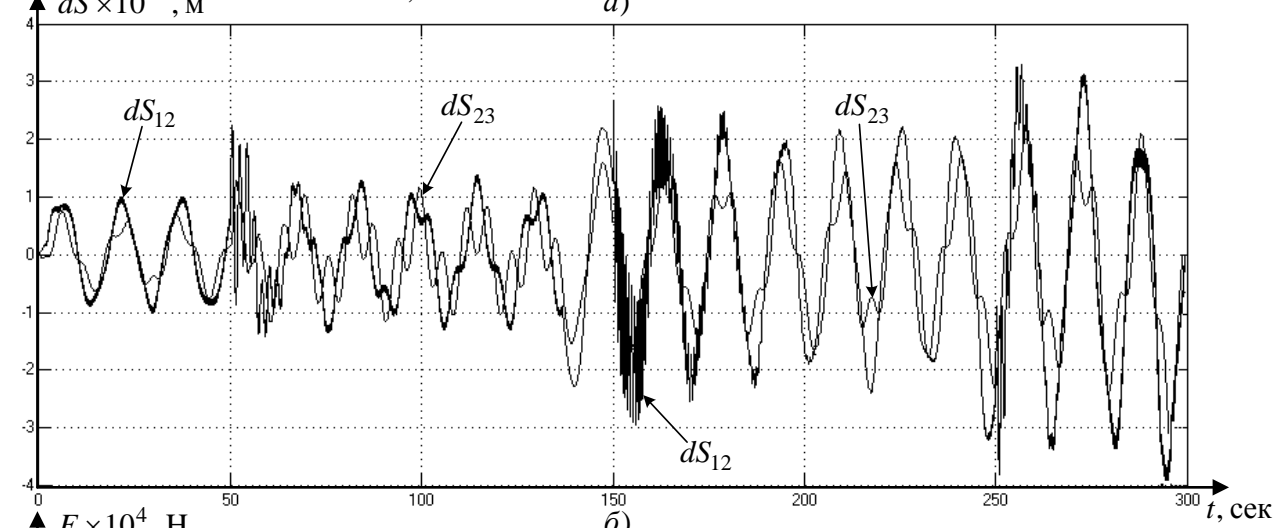
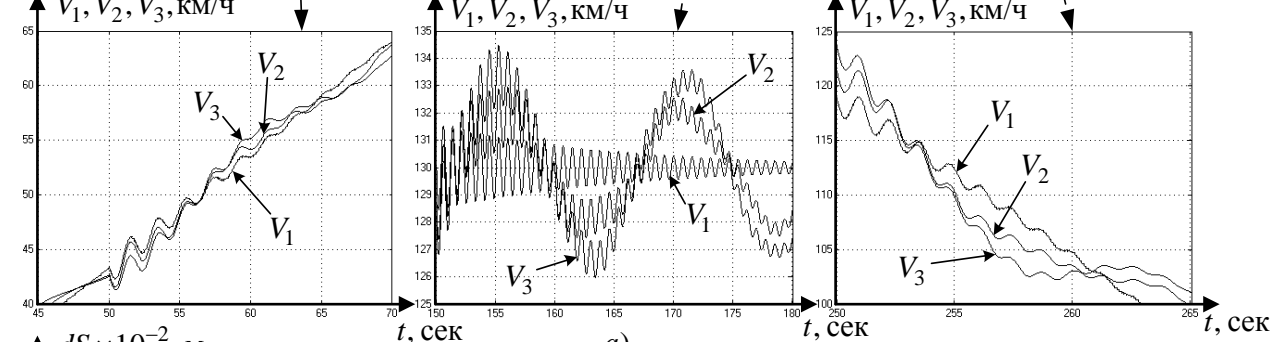
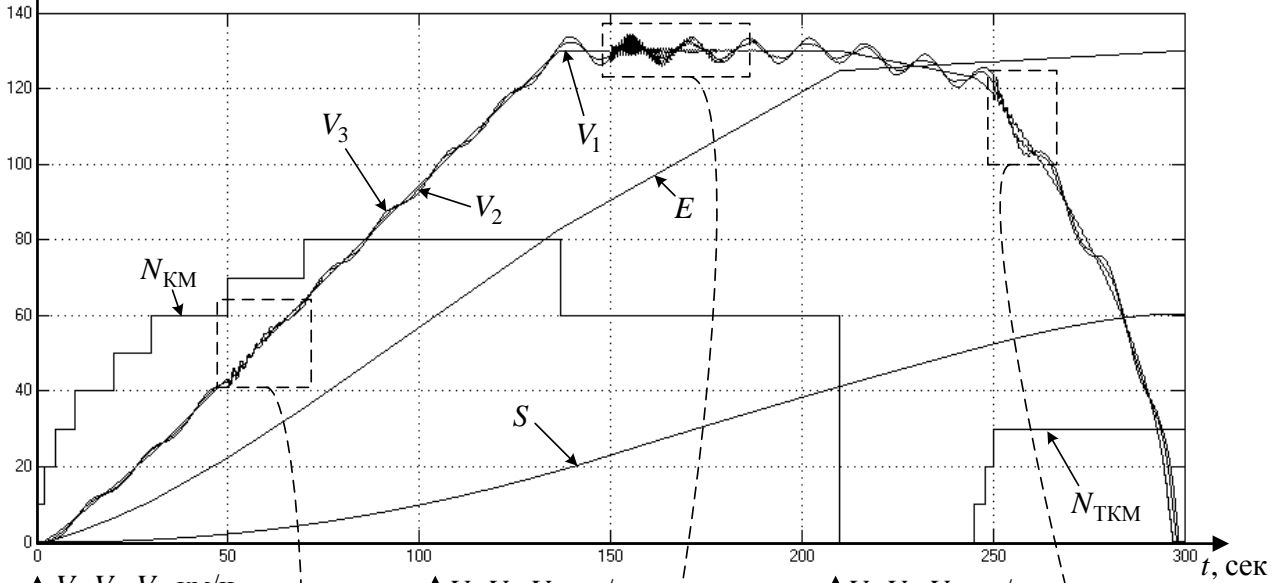


Рисунок 1 – Результати моделювання руху дизель-поїзда на моделі (1)

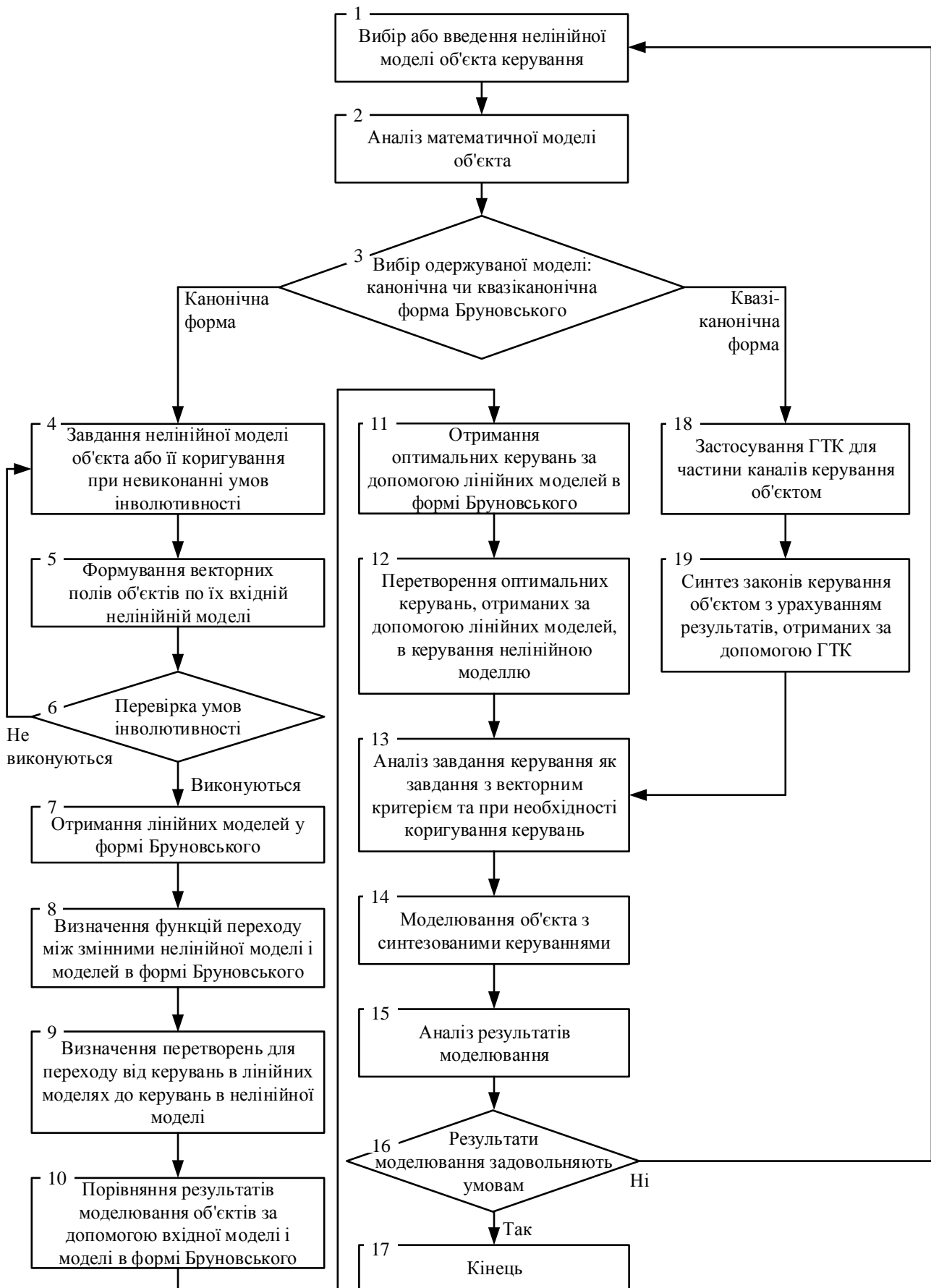


Рисунок 2 – Блок-схема людино-машинної системи, що автоматизує обчислення ГТК

При класичному застосуванні ГТК використовуються блоки: 1, 4 – 12, 14 – 17 (рис. 2). У пропонованому застосуванні ГТК для синтезу законів керування об'єктами, які описуються системами звичайних диференціальних рівнянь високого порядку, що містять десятки рівнянь, повинні використовуватися також блоки: 2, 3, 13, 18, 19 (рис. 2). Крім цього, запропоновано модифікувати перевірку умов інволютивності та отримання функцій переходу між змінними нелінійної моделі та моделями в формі Бруновського. Останнє є складним завданням, яке вимагає розв'язання систем диференціальних рівнянь в частинних похідних при обмеженнях у вигляді диференціальних нерівностей. Такі системи рівнянь для свого вирішення потребують трудомістких алгоритмів або застосування евристичних підходів, або поєднання того й іншого.

Визначимо можливість автоматизації пошуку функцій перетворення між змінними нелінійної моделі і моделей у формі Бруновського на конкретному прикладі – математичній моделі дизель-поїзда (2), яка включає в себе два еквівалентних тягових двигуна:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_2; \quad \frac{dx_2}{dt} = a_{21}x_4x_6 + a_{22}x_7x_{10} - a_{23} - a_{24}x_2 - a_{25}x_2^2; \\ \frac{dx_3}{dt} &= a_{31}x_3 + U_1; \quad \frac{dx_4}{dt} = a_{41}x_4 + a_{42}x_3; \quad \frac{dx_5}{dt} = a_{51}x_2 + a_{52} \frac{x_6}{x_4}; \quad \frac{dx_6}{dt} = a_{61}x_6 + U_2; \\ \frac{dx_7}{dt} &= a_{71}x_7 + a_{72}x_8; \quad \frac{dx_8}{dt} = a_{81}x_8 + U_3; \quad \frac{dx_9}{dt} = a_{91}x_2 + a_{92} \frac{x_{10}}{x_7}; \quad \frac{dx_{10}}{dt} = a_{10,1}x_{10} + U_4, \end{aligned} \quad (2)$$

де x_1, x_2, \dots, x_{10} – фазові змінні; $a_{11}, a_{21}, a_{22}, \dots, a_{10,1}$ – постійні коефіцієнти, які враховують параметри двигунів обмоторених вагонів; U_i ($i = \overline{1, 4}$) – керування.

Для перетворення системи (2) до форми Бруновського необхідно виконання умов інволютивності для послідовності розподілів M^0, M^1, M^2 :

$$M^0 = \text{span}\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4\};$$

$$M^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, L_X Y_1, L_X Y_2, L_X Y_3, L_X Y_4\};$$

$$M^2 = \text{span}\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, L_X Y_1, L_X Y_2, L_X Y_3, L_X Y_4, L_X^2 Y_1, L_X^2 Y_2, L_X^2 Y_3, L_X^2 Y_4\},$$

де $\text{span}\{Y_1, \dots, Y_4\}$ – лінійна оболонка векторів Y_1, \dots, Y_4 ; $L_X Y_1, \dots, L_X Y_4$ та $L_X^2 Y_1, \dots, L_X^2 Y_4$ – відповідно, перші та другі похідні Лі вздовж векторного поля X векторних полів Y_1, \dots, Y_4 .

Перевірка виконання умов інволютивності зазначених розподілів визначила, що розподіл M^0 є інволютивним, а розподіл M^1 вже не є інволютивним, що призводить до необхідності введення додаткових фазових змінних в канали керування. Проведені обчислення показали, що домогтися виконання умов інволютивності розподілів вдається введенням двох інтеграторів в другий канал керування й одного інтегратора в четвертий канал

керування. Для розширеної моделі об'єкта керування введені такі позначення:

$$\begin{aligned} x_i^* = x_i, \quad i = \overline{1, 6}; \quad x_7^* = U_2; \quad \frac{dx_7^*}{dt} = x_8^*; \quad \frac{dx_8^*}{dt} = U_2^*; \\ x_i^* = x_{i-2}^*, \quad i = \overline{9, 12}; \quad x_{13}^* = U_4; \quad \frac{dx_{13}^*}{dt} = U_4^*. \end{aligned} \quad (3)$$

З розширеною моделлю (3) об'єкта керування пов'язані векторні поля:

$$X^* = \begin{pmatrix} a_{11}x_2^* \\ a_{21}x_4^*x_6^* + a_{22}x_9^*x_{13}^* - a_{23}x_2^* - a_{24}x_2^* - a_{25}(x_2^*)^2 \\ a_{31}x_3^* \\ a_{41}x_4^* + a_{42}x_3^* \\ a_{51}x_2^* + a_{52}(x_6^*/x_4^*) \\ a_{61}x_6^* + x_7^* \\ x_8^* \\ 0 \\ a_{71}x_9^* + a_{72}x_{10}^* \\ a_{81}x_{10}^* \\ a_{91}x_2^* + a_{92}(x_{12}^*/x_9^*) \\ a_{10,1}x_{12}^* + x_{13}^* \\ 0 \end{pmatrix}; \quad Y_1^* = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad Y_2^* = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad Y_3^* = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad Y_4^* = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Для перетворення розширеної моделі (3) до форми Бруновського необхідно виконання умови інволютивності для наступної послідовності розподілів:

$$\begin{aligned} M^{0*} &= \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*\}; \\ M^{1*} &= \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_{X^*}Y_1^*, L_{X^*}Y_2^*, L_{X^*}Y_3^*, L_{X^*}Y_4^*\}; \\ M^{2*} &= \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_{X^*}Y_1^*, L_{X^*}Y_2^*, L_{X^*}Y_3^*, L_{X^*}Y_4^*, \\ &\quad L_{X^*}^2Y_1^*, L_{X^*}^2Y_2^*, L_{X^*}^2Y_3^*, L_{X^*}^2Y_4^*\}; \\ M^{3*} &= \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_{X^*}Y_1^*, L_{X^*}Y_2^*, L_{X^*}Y_3^*, L_{X^*}Y_4^*, L_{X^*}^2Y_1^*, L_{X^*}^2Y_2^*, L_{X^*}^2Y_3^*, \\ &\quad L_{X^*}^2Y_4^*, L_{X^*}^3Y_1^*, L_{X^*}^3Y_2^*, L_{X^*}^3Y_3^*, L_{X^*}^3Y_4^*\}; \\ M^{4*} &= \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_{X^*}Y_1^*, L_{X^*}Y_2^*, L_{X^*}Y_3^*, L_{X^*}Y_4^*, L_{X^*}^2Y_1^*, L_{X^*}^2Y_2^*, L_{X^*}^2Y_3^*, \\ &\quad L_{X^*}^2Y_4^*, L_{X^*}^3Y_1^*, L_{X^*}^3Y_2^*, L_{X^*}^3Y_3^*, L_{X^*}^3Y_4^*, L_{X^*}^4Y_1^*, L_{X^*}^4Y_2^*, L_{X^*}^4Y_3^*, L_{X^*}^4Y_4^*\}. \end{aligned}$$

В результаті на основі теорії щодо лінійних еквівалентів для нелінійних афінних систем з декількома керуваннями канонічна форма Бруновського має наступний вигляд:

$$\frac{dy_i}{dt} = y_{i+1}, \quad i = \overline{1, 12}, \quad i \neq 3, 8, 10; \quad \frac{dy_3}{dt} = v_1; \quad \frac{dy_8}{dt} = v_2; \quad \frac{dy_{10}}{dt} = v_3; \quad \frac{dy_{13}}{dt} = v_4. \quad (5)$$

У цьому випадку існують перетворення $y_1 = T_1(\mathbf{x}^*) = T_1(x_1^*, x_2^*, \dots, x_{13}^*)$, $y_4 = T_2(\mathbf{x}^*) = T_2(x_1^*, x_2^*, \dots, x_{13}^*)$, $y_9 = T_3(\mathbf{x}^*) = T_3(x_1^*, x_2^*, \dots, x_{13}^*)$, $y_{11} = T_4(\mathbf{x}^*) = T_4(x_1^*, x_2^*, \dots, x_{13}^*)$, з яких шляхом диференціювання вздовж векторного поля $\mathbf{X}_1 = \mathbf{X}^* + u_1^* \mathbf{Y}_1^* + u_2^* \mathbf{Y}_2^* + u_3^* \mathbf{Y}_3^* + u_4^* \mathbf{Y}_4^*$ функцій $T_i(\mathbf{x}^*)$, $i = \overline{1, 4}$ можливо визначити y_k , $k = \overline{1, 13}$, $k \neq 1, 4, 9, 11$:

$$\frac{dy_1}{dt} = y_2 = L_{X_1} T_1(\mathbf{x}^*) = L_{X^*} T_1(\mathbf{x}^*) + \sum_{j=1}^4 u_j^* L_{Y_j^*} T_1(\mathbf{x}^*); \quad (6)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = y_3 = L_{X_1} (L_{X^*} T_1(\mathbf{x}^*)) = L_{X^*}^2 (T_1(\mathbf{x}^*)) + \sum_{j=1}^4 u_j^* L_{Y_j^*} (L_{X^*} T_1(\mathbf{x}^*)); \quad (7)$$

$$\frac{dy_3}{dt} = v_1 = L_{X_1} (L_{X^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*)) = L_{X^*}^3 (T_1(\mathbf{x}^*)) + \sum_{j=1}^4 u_j^* L_{Y_j^*} (L_{X^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*)); \quad (8)$$

$$\frac{dy_4}{dt} = y_5 = L_{X_1} T_2(\mathbf{x}^*) = L_{X^*} T_2(\mathbf{x}^*) + \sum_{j=1}^4 u_j^* L_{Y_j^*} T_2(\mathbf{x}^*); \quad (9)$$

$$\frac{dy_5}{dt} = y_6 = L_{X_1} (L_{X^*} T_2(\mathbf{x}^*)) = L_{X^*}^2 (T_2(\mathbf{x}^*)) + \sum_{j=1}^4 u_j^* L_{Y_j^*} (L_{X^*} T_2(\mathbf{x}^*)); \quad (10)$$

$$\frac{dy_6}{dt} = y_7 = L_{X_1} (L_{X^*}^2 T_2(\mathbf{x}^*)) = L_{X^*}^3 (T_2(\mathbf{x}^*)) + \sum_{j=1}^4 u_j^* L_{Y_j^*} (L_{X^*}^2 T_2(\mathbf{x}^*)); \quad (11)$$

$$\frac{dy_7}{dt} = y_8 = L_{X_1} (L_{X^*}^3 T_2(\mathbf{x}^*)) = L_{X^*}^4 (T_2(\mathbf{x}^*)) + \sum_{j=1}^4 u_j^* L_{Y_j^*} (L_{X^*}^3 T_2(\mathbf{x}^*)); \quad (12)$$

$$\frac{dy_8}{dt} = v_2 = L_{X_1} (L_{X^*}^4 T_2(\mathbf{x}^*)) = L_{X^*}^5 (T_2(\mathbf{x}^*)) + \sum_{j=1}^4 u_j^* L_{Y_j^*} (L_{X^*}^4 T_2(\mathbf{x}^*)); \quad (13)$$

$$\frac{dy_9}{dt} = y_{10} = L_{X_1} T_3(\mathbf{x}^*) = L_{X^*} T_3(\mathbf{x}^*) + \sum_{j=1}^4 u_j^* L_{Y_j^*} T_3(\mathbf{x}^*); \quad (14)$$

$$\frac{dy_{10}}{dt} = v_3 = L_{X_1} (L_{X^*} T_3(\mathbf{x}^*)) = L_{X^*}^2 (T_3(\mathbf{x}^*)) + \sum_{j=1}^4 u_j^* L_{Y_j^*} (L_{X^*} T_3(\mathbf{x}^*)); \quad (15)$$

$$\frac{dy_{11}}{dt} = y_{12} = L_{X_1} T_4(\mathbf{x}^*) = L_{X^*} T_4(\mathbf{x}^*) + \sum_{j=1}^4 u_j^* L_{Y_j^*} T_4(\mathbf{x}^*); \quad (16)$$

$$\frac{dy_{12}}{dt} = y_{13} = L_{X_1} (L_{X^*} T_4(\mathbf{x}^*)) = L_{X^*}^2 (T_4(\mathbf{x}^*)) + \sum_{j=1}^4 u_j^* L_{Y_j^*} (L_{X^*} T_4(\mathbf{x}^*)); \quad (17)$$

$$\frac{dy_{13}}{dt} = v_4 = L_{X_1} (L_{X^*}^2 T_4(\mathbf{x}^*)) = L_{X^*}^3 (T_4(\mathbf{x}^*)) + \sum_{j=1}^4 u_j^* L_{Y_j^*} (L_{X^*}^2 T_4(\mathbf{x}^*)). \quad (18)$$

Отримання функції $T_2(\mathbf{x}^*)$. Модель (5) дозволяє зробити висновок, що змінні y_4, y_5, y_6, y_7 не залежать від керувань, тому у співвідношеннях (9) – (12) множники при керуваннях u_1^*, u_2^*, u_3^* і u_4^* дорівнюють нулю:

$$L_{Y_i^*} T_2(\mathbf{x}^*) = L_{Y_i^*} (L_{X^*} T_2(\mathbf{x}^*)) = L_{Y_i^*} (L_{X^*}^j T_2(\mathbf{x}^*)) = 0, \quad i = \overline{1, 4}; \quad j = \overline{2, 3}. \quad (19)$$

При цьому коефіцієнти при керуваннях в рівнянні (13) не повинні дорівнювати нулю:

$$L_{Y_i^*} (L_{X^*}^4 T_2(\mathbf{x}^*)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial \mathbf{x}}, L_{X^*}^4 Y_i^* \right\rangle \neq 0, \quad i = \overline{1, 4}. \quad (20)$$

У загальному випадку функція $T_2(\mathbf{x}^*)$ може залежати від 13-ти змінних $x_1^*, x_2^*, \dots, x_{13}^*$. Співвідношення (19) дають можливість зменшити число змінних, від яких залежить функція $T_2(\mathbf{x}^*)$. Перші 12-ть диференціальних рівнянь в частинних похідних (19) для $T_2(\mathbf{x}^*)$ мають вигляд:

$$L_{Y_1^*} T_2(\mathbf{x}^*) = \left\langle \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, Y_1^* \right\rangle = \sum_{i=1}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot y_{1i} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 3}}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_3^*} \cdot 1 = 0; \quad (21)$$

$$L_{Y_2^*} T_2(\mathbf{x}^*) = \left\langle \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, Y_2^* \right\rangle = \sum_{i=1}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot y_{2i} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 8}}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_8^*} \cdot 1 = 0; \quad (22)$$

$$L_{Y_3^*} T_2(\mathbf{x}^*) = \left\langle \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, Y_3^* \right\rangle = \sum_{i=1}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot y_{3i} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 10}}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_{10}^*} \cdot 1 = 0; \quad (23)$$

$$L_{Y_4^*} T_2(\mathbf{x}^*) = \left\langle \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, Y_4^* \right\rangle = \sum_{i=1}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot y_{4i} = \sum_{i=1}^{12} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_{13}^*} \cdot 1 = 0; \quad (24)$$

$$L_{Y_1^*} (L_{X^*} T_2(\mathbf{x}^*)) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 3,4}}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_3^*} \cdot (-a_{31}) + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_4^*} \cdot (-a_{42}) = 0; \quad (25)$$

$$L_{Y_2^*} (L_{X^*} T_2(\mathbf{x}^*)) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 7}}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_7^*} \cdot (-1) = 0; \quad (26)$$

$$L_{Y_3^*} (L_{X^*} T_2(\mathbf{x}^*)) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 9,10}}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_9^*} \cdot (-a_{72}) + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_{10}^*} \cdot (-a_{81}) = 0; \quad (27)$$

$$L_{Y_4^*} (L_{X^*} T_2(\mathbf{x}^*)) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 12}}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_{12}^*} \cdot (-1) = 0; \quad (28)$$

$$\begin{aligned} L_{Y_1^*}(L_{X^*}^2 T_2(\mathbf{x}^*)) &= \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2,3,4,5}}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_2^*} \cdot (a_{21} a_{42} x_6^*) + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_3^*} \cdot (a_{31}^2) + \\ &+ \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_4^*} \cdot (a_{42}(a_{31} + a_{41})) + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_5^*} \cdot \left(-\frac{a_{42} a_{52} x_6^*}{(x_4^*)^2} \right) = 0; \end{aligned} \quad (29)$$

$$L_{Y_2^*}(L_{X^*}^2 T_2(\mathbf{x}^*)) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 6}}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_6^*} \cdot 1 = 0; \quad (30)$$

$$\begin{aligned} L_{Y_3^*}(L_{X^*}^2 T_2(\mathbf{x}^*)) &= \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2,9,10,11}}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_2^*} \cdot (a_{22} a_{72} x_{12}^*) + \\ &+ \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_9^*} \cdot (a_{72}(a_{71} + a_{81})) + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_{10}^*} \cdot (a_{81}^2) + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_{11}^*} \cdot \left(-\frac{a_{72} a_{92} x_{12}^*}{(x_9^*)^2} \right) = 0; \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} L_{Y_4^*}(L_{X^*}^2 T_2(\mathbf{x}^*)) &= \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2,11,12}}^{13} \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i^*} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_2^*} \cdot (a_{22} x_9^*) + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_{11}^*} \cdot \left(\frac{a_{92}}{x_9^*} \right) + \\ &+ \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_{12}^*} \cdot (a_{10,1}) = 0. \end{aligned} \quad (32)$$

Аналіз співвідношень (21) – (24), (26), (28) і (30) показав, що функція $T_2(\mathbf{x}^*)$ не залежить від наступних змінних: $x_3^*, x_8^*, x_{10}^*, x_{13}^*, x_7^*, x_{12}^*$ і x_6^* . Отже, з рівнянь (25) і (27) виходить, що функція $T_2(\mathbf{x}^*)$ не залежить і від змінних x_4^* та x_9^* . Решта похідних Лі (29), (31) та (32), а також $L_{Y_i^*}(L_{X^*}^j T_2(\mathbf{x}^*)) = 0$, $i = \overline{1, 4}$; $j = \overline{3, 4}$ не дозволяють додатково зменшити загальну кількість змінних, від яких не залежить функція $T_2(\mathbf{x}^*)$. Отже, функція $T_2(\mathbf{x}^*)$ може залежати від чотирьох змінних $T_2 = T_2(x_1^*, x_2^*, x_5^*, x_{11}^*)$. Крім того, зіставлення другої підсистеми рівнянь (9) – (13) з моделі у формі Бруновського (5) з підсистемою рівнянь, яка описує другий канал об'єкта керування, показує, що функція $T_2(\mathbf{x}^*)$ не залежить і від змінних x_1^*, x_5^*, x_{11}^* . Таким чином, функція $T_2(\mathbf{x}^*)$ залежить тільки від однієї змінної x_2^* .

Функція $T_2 = T_2(x_2^*)$ повинна також задовольняти нерівностям (20), які, після обчислення $L_{X^*}^4 Y_i^*$ ($i = \overline{1, 4}$), мають вигляд:

$$\begin{aligned} L_{Y_1^*}(L_{X^*}^4 T_2(\mathbf{x}^*)) &= \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial x}, L_{X^*}^4 Y_1^* \right\rangle = \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_2^*} \cdot ((a_{24} + 2a_{25} x_2^*)(a_{21} a_{42} x_6^* \cdot (a_{31} + a_{41}) - \\ &- a_{21} a_{42} (x_7^* + a_{61} x_6^*) + a_{21} a_{42} x_6^* (a_{24} + 2a_{25} x_2^*)) - (x_7^* + a_{61} x_6^*) \cdot (a_{21} a_{42} (a_{31} + a_{41}) + \\ &+ a_{21} a_{42} (a_{24} + 2a_{25} x_2^*) - a_{21} a_{42} a_{61}) + a_{21} x_6^* (a_{41} a_{42} (a_{31} + a_{41}) + a_{31}^2 a_{42}) + a_{21} a_{42} x_8^* - \end{aligned}$$

$$-2a_{21}a_{25}a_{42}x_6^*(a_{25}(x_2^*)^2 + a_{24}x_2^* + a_{23} + a_{21}x_4^*x_6^* + a_{22}x_{12}^*x_9^*)) \neq 0;$$

$$L_{Y_2}^*(L_{X^*}^4 T_2(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial x}, L_{X^*}^4 Y_2^* \right\rangle = \frac{\partial T_2(x^*)}{\partial x_2} \cdot (a_{21}x_4^*(a_{24} + 2a_{25}x_2^*) -$$

$$-a_{21}(a_{42}x_3^* + a_{41}x_4^*) + a_{21}a_{61}x_4^*) \neq 0;$$

$$L_{Y_3}^*(L_{X^*}^4 T_2(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial x}, L_{X^*}^4 Y_3^* \right\rangle = \frac{\partial T_2(x^*)}{\partial x_2} \cdot ((a_{24} + 2a_{25}x_2^*)(a_{22}a_{72}x_{12}^*(a_{71} + a_{81}) -$$

$$-a_{22}a_{72}(x_{13}^* + a_{101}x_{12}^*) + a_{22}a_{72}x_{12}^*(a_{24} + 2a_{25}x_2^*)) - (x_{13}^* + a_{101}x_{12}^*) \cdot (a_{22}a_{72}(a_{71} + a_{81}) + a_{22}a_{72}(a_{24} + 2a_{25}x_2^*) - a_{101}a_{22}a_{72}) + a_{22}x_{12}^*(a_{71}a_{72} \cdot (a_{71} + a_{81}) + a_{72}a_{81}^2) -$$

$$-2a_{22}a_{25}a_{72}x_{12}^*(a_{25}(x_2^*)^2 + a_{24}x_2^* + a_{23} + a_{21}x_4^*x_6^* + a_{22}x_{12}^*x_9^*)) \neq 0;$$

$$L_{Y_4}^*(L_{X^*}^4 T_2(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial x}, L_{X^*}^4 Y_4^* \right\rangle = \frac{\partial T_2(x^*)}{\partial x_2} \cdot (a_{22}(a_{24} + 2a_{25}x_2^*)(x_9^*(a_{101} + a_{24} - a_{71} +$$

$$+ 2a_{25}x_2^*) - a_{72}x_{10}^*) - a_{22}(a_{72}x_{10}^* + a_{71}x_9^*)(a_{101} + a_{24} - a_{71} + 2a_{25}x_2^*) + a_{101}^2 a_{22}x_9^* -$$

$$-2a_{22}a_{25}x_9^*(a_{25}(x_2^*)^2 + a_{24}x_2^* + a_{23} + a_{21}x_4^*x_6^* + a_{22}x_{12}^*x_9^*)) + a_{22}a_{72}a_{81}x_{10}^*) \neq 0.$$

Утворені співвідношення не дорівнюють нулю при $x_4^* \neq 0$, $x_7^* \neq 0$, $x_{10}^* \neq 0$ та $x_{13}^* \neq 0$. Це свідчить, що рішення $T_2 = T_2(x_2^*)$, отримане з диференціальних рівнянь в частинних похідних (19) та нерівностей (20), є вірним.

Шляхом послідовного диференціювання функції $y_4 = T_2(x^*) = x_2^*$ вздовж векторного поля $X_1 = X^* + u_1^* Y_1^* + u_2^* Y_2^* + u_3^* Y_3^* + u_4^* Y_4^*$ визначаються змінні y_5 , y_6 , y_7 , y_8 другої підсистеми канонічної форми Бруновського (5):

$$y_4 = x_2^*; \quad y_5 = a_{25}(x_2^*)^2 + a_{24}x_2^* + a_{23} + a_{21}x_4^*x_6^* + a_{22}x_{12}^*x_9^*;$$

$$y_6 = (a_{24} + 2a_{25}x_2^*)(a_{25}(x_2^*)^2 + a_{24}x_2^* + a_{23} + a_{21}x_4^*x_6^* + a_{22}x_{12}^*x_9^*) + a_{21}x_6^*(a_{42}x_3^* +$$

$$+ a_{41}x_4^*) + a_{22}x_{12}^*(a_{72}x_{10}^* + a_{71}x_9^*) + a_{22}x_9^*(x_{13}^* + a_{101}x_{12}^*) + a_{21}x_4^*(x_7^* + a_{61}x_6^*);$$

$$y_7 = (a_{25}(x_2^*)^2 + a_{24}x_2^* + a_{23} + a_{21}x_4^*x_6^* + a_{22}x_{12}^*x_9^*)(2a_{23}a_{25} + a_{24}^2 + 6a_{25}^2(x_2^*)^2 +$$

$$+ 6a_{24}a_{25}x_2^* + 2a_{21}a_{25}x_4^*x_6^* + 2a_{22}a_{25}x_{12}^*x_9^*) + a_{21}x_4^*x_8^* + a_{22}(a_{72}x_{10}^* + a_{71}x_9^*)(x_{13}^* + \dots$$

$$y_8 = (a_{25}(x_2^*)^2 + a_{24}x_2^* + a_{23} + a_{21}x_4^*x_6^* + a_{22}x_{12}^*x_9^*)((a_{24} + 2a_{25}x_2^*)(a_{24}^2 + 2a_{25}(a_{23} +$$

$$+ 3a_{25}(x_2^*)^2 + 3a_{24}x_2^* + a_{21}x_4^*x_6^* + a_{22}x_{12}^*x_9^*)) + 6a_{25}(a_{24} + 2a_{25}x_2^*)(a_{25}(x_2^*)^2 + \dots$$

Практичне застосування ГТК до моделей електроприводу та досвід використання ГТК іншими авторами дозволяє функцію перетворення для багатьох задач записати у вигляді:

$$T_g(x_k, x_l, \dots, x_p) = x_g, \quad x_g \in M = \{x_k, x_l, \dots, x_p\};$$

$$T_g(x_k, x_l, \dots, x_p) = x_g + x_{g1}, \quad x_g, x_{g1} \in M; \quad (33)$$

$$T_g(x_k, x_l, \dots, x_p) = x_k + x_l + \dots + x_p, \quad x_k, x_l, x_p \in M,$$

де $T_g(x_k, x_l, \dots, x_p)$ – функція перетворення для g -ї клітини форми Бруновського, якій відповідають змінні x_k, x_l, \dots, x_p об'єкта керування, що не виключені з числа аргументів на першому етапі її визначення. Архітектура нейронної мережі для пошуку функцій (33) має вигляд, представлений на рис. 3.

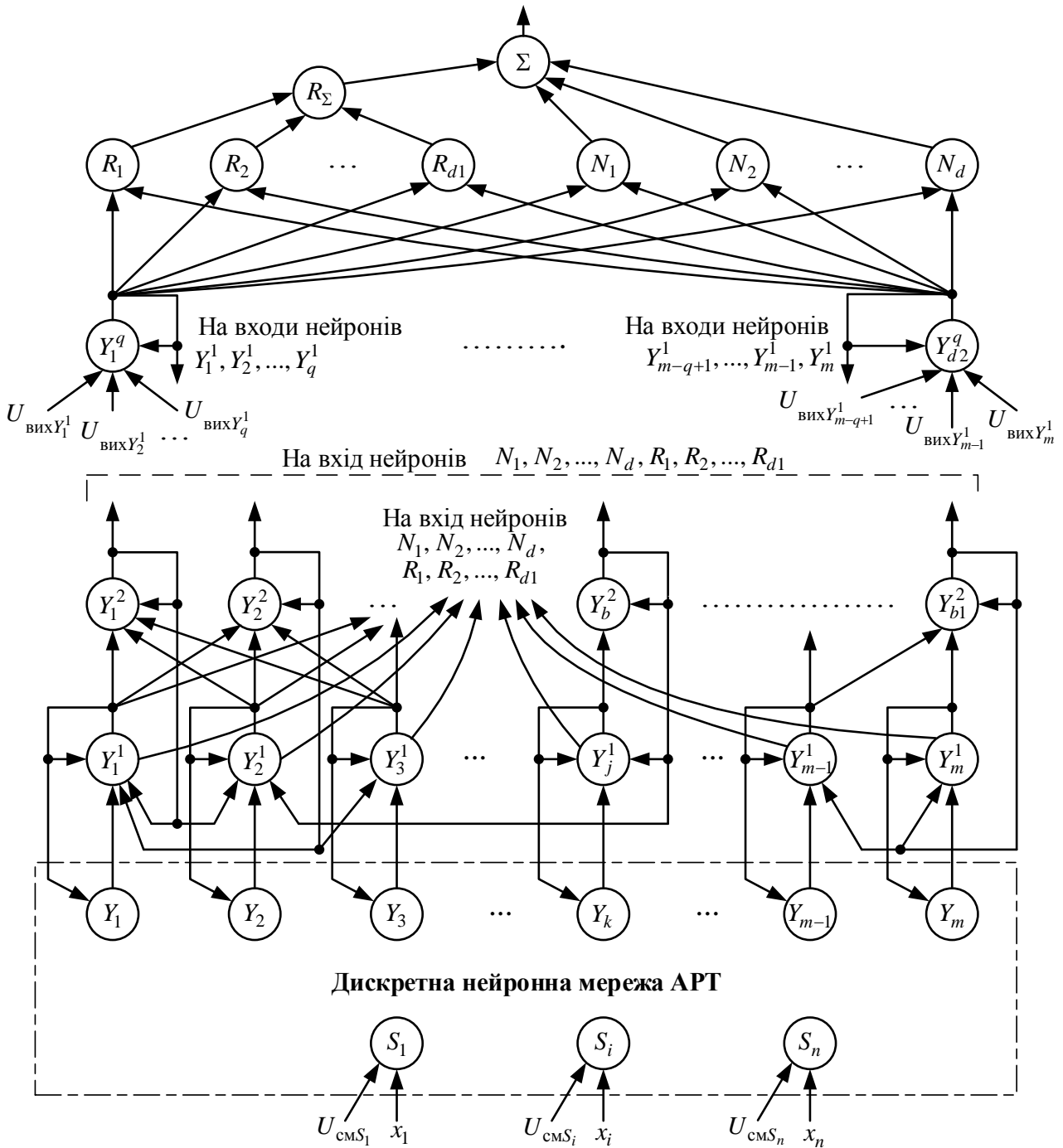


Рисунок 3 – Нейронна мережа для пошуку функцій перетворення

На вхідні нейрони сенсорного шару $S_1, \dots, S_i, \dots, S_n$ (рис. 3) надходять поодинокі сигнали, що моделюють аргументи функції перетворення $T_1(\mathbf{x}) = T_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Якщо в процесі аналізу функції $T(\mathbf{x})$ вдається з'ясувати її незалежність від аргументів, наприклад, $x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{lr}$, то на входи відповідних нейронів $S_{l1}, S_{l2}, \dots, S_{lr}$ подається негативне зміщення

$U_{cmS_{l_1}} = U_{cmS_{l_2}} = \dots = U_{cmS_{l_r}} = -1$. В результаті на входах нейронів сенсорного S -шару будуть нульові вхідні сигнали: $U_{vxS_{l_1}} = U_{vxS_{l_2}} = \dots = U_{vxS_{l_r}} = 0$, а на входах інших нейронів – одиничні вхідні сигнали. Шар Y^1 -нейронів служить для запам'ятовування рішень виду $T(\mathbf{x}) = x_k$, $k \in M = \{1, 2, \dots, m\}$ та використовується, коли на входи мережі подаються окремі аргументи, від яких може залежати функція $T(\mathbf{x})$. Вихідний сигнал нейрона переможця Y^1 -шару поступає на входи R -нейронів, які перевіряють виконання рівнянь (19), та N -нейронів, які перевіряють виконання нерівностей (20). Шар Y^2 -нейронів служить для запам'ятовування рішень виду $T(\mathbf{x}) = x_k + x_{k_1}$, $k, k_1 \in M = \{1, 2, \dots, m\}$. На вхід нейронної мережі подаються пари можливих аргументів функції $T(\mathbf{x})$. На початку подається один аргумент, наприклад, x_k , який розпізнається нейроном Y_k з Y -шару, а потім запам'ятовується нейроном Y_k^1 з Y^1 -шару, після цього подається сигнал, відповідний аргументу x_{k_1} , який запам'ятовується нейроном $Y_{k_1}^1$. Одиничні вихідні сигнали нейронів Y_k^1 та $Y_{k_1}^1$ надходять на входи елемента Y^2 -шару, одиничний вихідний сигнал якого відповідає можливому рішенню $x_k + x_{k_1}$. Цей сигнал надходить на входи R - та N -нейронів, які спільно з нейроном Σ визначають, чи є співвідношення $T(\mathbf{x}) = x_k + x_{k_1}$ функцією перетворення чи ні. Аналогічним чином перевіряються всі функції перетворення, що залежать від двох аргументів. Шар Y^q -нейронів служить для запам'ятовування рішень виду $T(\mathbf{x}) = x_k + x_{k_1} + \dots + x_{k_q}$ й функціонує аналогічно до шарів Y^1 та Y^2 .

Таким чином, на основі дискретної нейронної мережі АРТ розроблено перспективний підхід до реалізації пошуку функцій перетворення, які пов'язують змінні лінійних та нелінійних моделей.

Запропоновано на основі ГТК новий метод синтезу регуляторів складними технічними об'єктами, що містять впливаючі один на одного канали керування та (або) випадки, коли два або більше каналів керування виконують аналогічні функції. Такі об'єкти пропонується представляти в квазіканонічній формі, коли частина каналів керування описується в канонічній формі Бруновського, а частина каналів залишається описаною у вхідній формі або в деякій перетвореній формі, яка не співпадає з формою Бруновського. При цьому, для першої частини каналів синтез регуляторів виконується за допомогою ГТК, а для другої – іншими методами теорії керування, після чого відбувається об'єднання результатів. Однак забезпечення оптимального функціонування окремих каналів керування багатовимірної системи в загальному випадку не забезпечує оптимальності функціонування об'єкта в цілому. Це можливо, коли, наприклад, два або більше каналів керування мають аналогічні функції. У зв'язку з цим запропоновано двоетапний метод пошуку оптимальних керувань, при якому на першому рівні пропонується пошук оптимальних керувань на рівні каналів керування, а на другому – оптимізація на рівні всього об'єкта.

У четвертому розділі на базі розроблених методів, які розширюють застосування ГТК, створено програмне забезпечення (рис. 4), що реалізує людино-машинний синтез регуляторів складними об'єктами. Розроблено три програмні бібліотеки, що містять: різні математичні моделі дизель-поїзда; спеціалізовані програмні функції обчислення похідних Лі, перевірки умов інволютивності й т.д.; нейронні мережі АРТ для пошуку функцій перетворення.

Для програмної бібліотеки (рис. 4, блок 13) створено функцію *involutivity*, що перевіряє виконання умов інволютивності послідовності розподілів при перетворенні широкого класу нелінійних систем керування до канонічної форми Бруновського. Функція *involutivity*(M, x), що застосовується при роботі блоків 6, 7 або 10, 11 (рис. 4), перевіряє виконання умов інволютивності для розподілів виду: $M^0 = \text{span}\{Y_1, Y_2, \dots, Y_q\}$, $M^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, \dots, Y_q, L_X Y_1, L_X Y_2, \dots, L_X Y_q\}$, ..., M^n , де M^0, M^1, \dots, M^n – розподіли нульового, першого, ..., n -го порядку; Y_1, Y_2, \dots, Y_q – керуючі векторні поля об'єкту; $L_X Y_1, L_X Y_2, \dots, L_X Y_q$ – похідні Лі вздовж векторного поля X , векторних полів Y_1, Y_2, \dots, Y_q . Робота програмної функції *involutivity* основана на роботі інших розроблених програмних функцій: диференціювання вектору *diffvec*(S, X, n), яка символічно диференціює вираз S щодо вектору X n раз, де n – натуральне число; обчислення похідної Лі N -го порядку; *Dif_Li*(X, Y, x, N), яка повертає масив з N елементів, в якому знаходяться з першої по N -ну похідні Лі векторного поля Y вздовж векторного поля X за елементами вектору x . Функція *Dif_Li* основана на роботі функції диференціювання Лі *diffli*($X, Y, variables$), яка диференціює векторне поле Y вздовж векторного поля X , використовуючи символічні змінні вектору *variables*

$$L_X Y = [X, Y] = \frac{\partial Y}{\partial x} \cdot X - \frac{\partial X}{\partial x} \cdot Y = \begin{pmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial y_n}{\partial x_1} & \frac{\partial y_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \cdot X - \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \cdot Y.$$

Для програмної бібліотеки (рис. 4, блок 13) створено програмну функцію *brunovsky*(X, Y, T, x, N), яка здійснює диференціювання функції перетворення T вздовж векторних полів X та Y за елементами вектору x та повертає для кожної клітини форми Бруновського символічний масив, що пов'язує змінні лінійної та нелінійної моделей, а також нове керування.

Результати тестування створеного програмного забезпечення довели його працездатність, зокрема, з його допомогою синтезовано лінійні моделі у формі Бруновського, які еквівалентні моделі (1):

$$\frac{dz_i}{dt} = z_{i+1}, \quad i = \overline{1, 29}, \quad i \neq 5, 10, 15, 20, 25; \quad \frac{dz_{5j}}{dt} = v_j, \quad j = \overline{1, 6}, \quad (34)$$

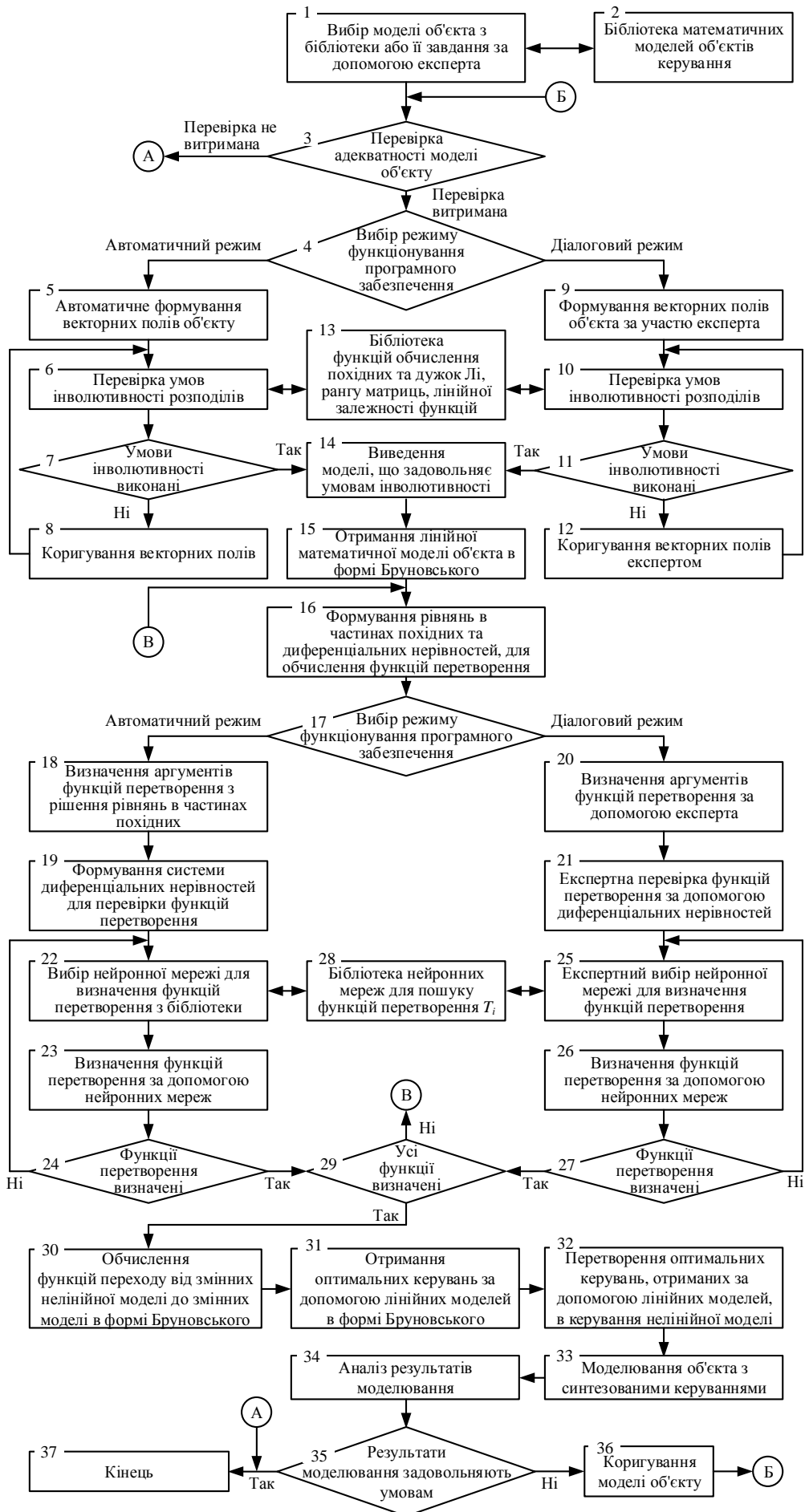


Рисунок 4 – Алгоритм функціонування розробленого програмного забезпечення

де $z_1 = S$; $z_2 = \Psi_{\alpha 2}^1$; $z_3 = \Psi_{\beta 2}^1$; $z_4 = \Psi_{\alpha 1}^1$; $z_5 = U_1$; $z_6 = V_1$; $z_7 = \omega^1$; $z_8 = \Psi_{\beta 1}^1$; $z_9 = U_2$; $z_{11} = F_{12}$; $z_{12} = \Psi_{\beta 2}^2$; $z_{13} = \Psi_{\alpha 2}^2$; $z_{14} = \Psi_{\alpha 1}^2$; $z_{15} = U_3$; $z_{16} = V_2$; $z_{17} = \omega^2$; $z_{18} = \Psi_{\beta 1}^2$; $z_{19} = U_4$; $z_{21} = F_{23}$; $z_{22} = \Psi_{\alpha 2}^3$; $z_{23} = \Psi_{\beta 2}^3$; $z_{24} = \Psi_{\alpha 1}^3$; $z_{25} = U_5$; $z_{26} = V_3$; $z_{27} = \omega^3$; $z_{28} = \Psi_{\beta 1}^3$; $z_{29} = U_6$; v_j ($j = \overline{1, 6}$) – керування. Таким чином, при $i(S) \equiv 0$, $\omega_r(S) \equiv 0$, модель (1) розбивається на шість незалежних лінійних підсистем п'ятого порядку в канонічній формі Бруновського, кожна з яких містить лише одне керування. Для цих підсистем за допомогою розробленого програмного забезпечення отримано функції перетворення, що зв'язують змінні та керування у моделях (34) та (1). Це дозволило за допомогою принципу максимуму вирішити задачу оптимального керування дизель-поїздом та отримати для кожної ділянки залізничної колії закони керування, що забезпечують графік руху при відомих обмеженнях на прискорення й максимальну швидкість та мінімальну витрату паливо-енергетичних ресурсів з урахуванням комфортних умов для пасажирів поїзда.

У п'ятому розділі запропоновані модифікації нейронної мережі (рис. 3), що здійснює пошук функцій перетворення. Модифікації пов'язані з тим, що функції перетворення не вичерпуються співвідношеннями виду (33). Якщо у співвідношенні (25) функція $T_2(\mathbf{x})$ залежить від аргументів x_3^* та x_4^* , тоді для виконання умов (25) необхідно виконання рівності

$$-\frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_3^*} \cdot a_{31} - \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_4^*} \cdot a_{42} = 0, \quad (35)$$

що можливо за умови, якщо функція $T_2(\mathbf{x}^*)$ містить складові виду $T_2^{1\text{сл}}(x_3^*, x_4^*) = a_{42}x_3^* - a_{31}x_4^*$ або $T_2^{2\text{сл}}(x_3^*, x_4^*) = a_{42}c_1x_3^* - a_{31}c_1x_4^*$, де c_1 – довільна дійсна константа. Аналогічно, якщо функція $T_2(\mathbf{x}^*)$ залежить від x_9^* та x_{10}^* , тоді з (27) виходить умова

$$-\frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_9^*} \cdot a_{72} - \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_{10}^*} \cdot a_{81} = 0, \quad (36)$$

для виконання якої функція $T_2(\mathbf{x}^*)$ повинна містити складові виду $T_2^{3\text{сл}}(x_9^*, x_{10}^*) = a_{81}x_9^* - a_{72}x_{10}^*$ або $T_2^{4\text{сл}}(x_9^*, x_{10}^*) = a_{81}c_2x_9^* - a_{72}c_2x_{10}^*$, де c_2 – довільна дійсна константа. Якщо співвідношення (21) – (32) містять більшу кількість ненульових складових, то відповідне число складових повинна містити і функція $T_2(\mathbf{x}^*)$.

Запропоновані модифікації мережі (рис. 3), які дозволили використовувати її також для пошуку функцій перетворення з безперервними коефіцієнтами виду: $T_g(x_k, x_l, \dots, x_p) = \sum_{q=k}^p c_q x_q + \sum_{q=k}^p \sum_{q_1=l}^p c_{q,q_1} x_q x_{q_1} + \dots$, де $\sum_{q=k}^p$ – сума, у якій індекс q приймає значення k, l, \dots, p ; c_q, c_{q,q_1}, \dots – дійсні коефіцієнти.

На основі розроблених модифікацій для нейронних мереж запропоновано узагальнення підходу, пов'язаного з введенням у вихідну архітектуру шару додаткових нейронів, що рееструють, на інші нейронні мережі, за рахунок чого у них з'являється можливість визначення декількох рішень. Крім цього, проаналізовано недоліки нейронних мереж АРТ та обґрунтовано необхідність синтезу нових архітектур та алгоритмів функціонування стабільно-пластичних нейронних мереж. Нові архітектури, з одного боку, зберігають позитивні властивості стабільно-пластичних дискретних нейронних мереж АРТ, а з іншого боку, використовують в процесі свого функціонування міру близькості по відстані Хеммінга, тобто параметр подібності між вхідним і еталонними зображеннями, який враховує всі компоненти бінарних векторів. Це дозволяє суттєво розширити можливості стабільно-пластичних нейронних мереж.

Розроблено стабільно-пластичні нейронні мережі Хеммінга, здатні розпізнавати нову інформацію, донавчатися в процесі функціонування та визначати декілька рівноцінних рішень, використовуючи при цьому параметр подібності між вхідним та еталонними зображеннями, який враховує всі компоненти бінарних векторів, що дозволяє використовувати їх як альтернативу дискретним мережам АРТ.

Наведено узагальнення результатів, отриманих для мереж Хеммінга, та особливостей функціонування мереж АРТ на архітектурі інших нейромережевих структур. Завдяки введенню надлишкових нейронів в архітектуру класичних нейронних мереж Хебба і мереж на основі перцептрона, отримано нові архітектури та алгоритми функціонування цих мереж, що здатні розпізнавати нову інформацію та донавчатися в процесі свого функціонування.

У шостому розділі запропонована модифікація існуючої СППРМ дизель-поїзда, яка, крім вже існуючих блоків, включає в себе: блок прогнозування та боротьби з буксуванням, блок діагностики, базу даних, підсистему моделювання, блок прогнозування наслідків керування, а також підсистему автоматичного керування, яка включає в себе блок вибору мети керування, програму досягнення мети і алгоритм керування. Наведено характеристики, алгоритми функціонування та обґрунтування необхідності розробки нових блоків СППРМ. Визначено алгоритми функціонування та властивості тих блоків, робота яких була модифікована або змінена. До останніх відносяться база знань та підсистема моделювання.

Таким чином, для дизель-поїзда отримала подальший розвиток бортова СППРМ, яка дозволяє в реальних умовах швидкісного руху й поточної зміни дорожньої обстановки видавати машиністу закони керування, при застосуванні яких виконується графік руху, мінімізується витрата паливо-енергетичних ресурсів та підтримуються комфортні умови для пасажирів. Розроблені компоненти бортової СППРМ: база даних та блок діагностики, а також модифікована структура та алгоритми роботи бази знань.

База даних СППРМ здійснює компактне зберігання інформації про програмну траєкторію руху поїзда і закони керування, які розраховані заздалегідь для всіх перегонів та маршрутів з урахуванням пори року, розкладу, можливих погодних умов, а також можливих обмежень по

швидкості і часу, та забезпечуючих комфорті умови пасажирів. Для цього база даних СППРМ повинна мати можливість відновлення зі своєї пам'яті по одному заданому машиністом поїзда параметру множини з N взаємопов'язаних між собою змінних. Така властивість необхідна для того, щоб машиніст для кожного обраного ним перегону міг одночасно отримувати: траєкторії руху поїзда з можливими обмеженнями максимальної швидкості й відповідні до них стратегії перемикання позицій тягового і гальмівного контролерів машиніста. Отже, база даних СППРМ повинна забезпечувати асоціативне зберігання інформації, тобто зберігати у вигляді асоціативних векторів для відповідних перегонів маршруту, траєкторії руху поїзда і стратегії керування рухомим складом. Більшості описаних характеристик задовольняє база даних, створена на основі нейронної мережі ДАП. Однак класична архітектура й алгоритми роботи ДАП не передбачають можливість одночасного відновлення з пам'яті мережі множини асоціативних зображень, що призводить до необхідності розробки нових нейромережових структур: дискретної N -направленої асоціативної пам'яті, яка здатна відновлювати по вхідному вектору множину з N векторів, що асоційовані між собою та до вхідної інформації, та багатошарову асоціативну пам'ять з керуючими нейронами, яка здатна відновлювати по вхідній інформації ланцюжки асоціацій та коригувати результати з урахуванням додаткової інформації.

Побудова нової N -направленої нейромережової асоціативної пам'яті здійснена завдяки тому, що архітектура класичної ДАП перебудована шляхом введення в її структуру додаткових $(N-1)$ сенсорних шарів нейронів, які пов'язані з першим шаром сенсорних елементів парами двонаправлених зв'язків з відповідними ваговими коефіцієнтами. У результаті досягається можливість зберігання та відновлення з пам'яті мережі множинних асоціацій. Це стає можливим завдяки тому, що вхідний сенсорний шар нейронів пов'язаний одразу з N групами елементів, що дозволяє одному вхідному вектору асоціювати N вихідних. Алгоритм навчання асоціативної пам'яті зводиться до визначення r наборів векторів $(S_1, S_1^1, \dots, S_1^N), \dots, (S_r, S_r^1, \dots, S_r^N)$, які запам'ятовуються N -направленою асоціативною пам'яттю, та матриць ваг зв'язків $W^{11}, W^{12}, \dots, W^{N1}, W^{N2}$ між шарами нейронів: X та Y^1, \dots, X та Y^N . Оскільки кожна пара шарів X та Y^d ($d=1, N$) мають архітектуру ДАП, то їх навчання виконується аналогічно класичному алгоритму навчання ДАП. Послідовне застосування цього алгоритму до шарів нейронів X та Y^1, \dots, X та Y^N дозволяє запам'ятати всю множину груп асоціативних векторів.

Побудова двонаправленої багатошарової дискретної нейромережової асоціативної пам'яті з керуючими нейронами здійснена завдяки тому, що архітектура класичної ДАП перебудована шляхом заміни одного з сенсорних шарів нейронів на N шарів, які послідовно пов'язані один з одним парами двонаправлених зважених зв'язків, та додаванням N керуючих шарів нейронів R^i ($i=1, N$). При цьому кожна пара сусідніх шарів нейронів фактично є класичною ДАП. В результаті цього виникає можливість будь-якому вектору

$Z_{\text{вх.}}^i = (Z_{1\text{вх.}}^i, Z_{2\text{вх.}}^i, \dots, Z_{q_i\text{вх.}}^i)$ деякого шару мережі $Z^i (i=\overline{1, N})$ поставити у відповідність асоціативний вектор $Z_{\text{вих.}}^{i+1}$ на виході Z^{i+1} шару, а вектор $Z_{\text{вх.}}^i$ розглядати як асоціацію вхідному вектору попереднього шару нейронної мережі. За допомогою шарів керуючих нейронів $R^i (i=\overline{1, N})$ здійснюється корекція векторів $Z_{\text{вх.}}^i (i=\overline{1, N})$, що є складовими ланцюжка асоціативних векторів. В результаті будь-який вектор на вході X -шару породжує ланцюжок з N асоціацій, де кожен вектор $Z^i (i=\overline{1, N-1})$ входить в дві асоціації, які можна редагувати за допомогою відповідних керуючих нейронів. Алгоритм навчання зводиться до визначення навчального набору векторів та вагових матриць зв'язків між шарами нейронів: $X_i, Z^1, Z^2, \dots, Z^N$. Оскільки будь-які два Z шари нейронів Z^1 і Z^2, Z^2 і Z^3, \dots, Z^{N-1} і Z^N мають архітектуру ДАП, то їх функціонування аналогічно класичному алгоритму роботи ДАП. Послідовне застосування класичного алгоритму ДАП до шарів нейронів Z^1 і Z^2, Z^2 і Z^3, \dots, Z^{N-1} і Z^N дозволяє отримувати весь ланцюжок асоціативних векторів $S^V, S^{V1}, S^{V2}, \dots, S^{VN}$, де S^V – вхідне зображення, $S^{Vd} (d=1, 2, \dots, N)$ – зображення на виходах нейронів відповідних шарів X, Z^1, Z^2, \dots, Z^N . При цьому додавання в структуру нейромережевої пам'яті N шарів керуючих нейронів дає можливість побудови асоціацій з урахуванням додаткової інформації. Це стає можливим завдяки тому, що керуючі нейрони пов'язані з відповідними шарами нейронної мережі та при появі інформації на входах шарів можуть її коригувати з урахуванням інформації на входах керуючих нейронів. Таким чином, на основі класичних нейронних мереж ДАП запропоновано нові архітектури мереж, які в сукупності використовуються в якості бази даних СППРМ.

На основі дискретних нейронних мереж АРТ розроблено базу знань СППРМ, що має можливість компактного зберігання й відновлення зі своєї пам'яті по вхідній інформації множини з N асоціативних один до одного та до вхідних даних зображень, які представлені бінарними векторами, а також властивістю донавчання та стабільного зберігання інформації, що була запам'ятована раніше. База знань накопичує під час руху поїзда інформацію, отриману від інформаційно-вимірювальної системи, та в спеціальних режимах роботи надає її експертам депо для аналізу технічного стану рухомого складу або для поповнення бази даних.

Розроблено блок діагностики СППРМ на базі ієрархічної нейронної мережі АРТ, яка здійснює контроль перекосу фаз тягових асинхронних двигунів під час руху дизель-поїзда.

У додатках наведені: результати роботи розробленого програмного забезпечення; синтез законів оптимального керування; розробка архітектур та алгоритмів функціонування безперервних нейронних мереж АРТ та ДАП на її основі; приклад функціонування стабільно-пластичної нейронної мережі Хебба; приклад побудови бази даних СППРМ; акти впровадження результатів роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано науково-прикладну проблему розробки СППРМ 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 ГТК, нової технології обробки інформації на основі стабільно-пластичних нейронних мереж та нових моделей асоціативної пам'яті.

До основних результатів роботи відносяться:

1. Визначені тенденції розвитку методів математичного моделювання та синтезу систем автоматичного керування тяговим рухомим складом, які визначили перспективні напрямки вдосконалення існуючих автоматизованих систем керування та підтримки прийняття рішень, що застосовуються на сучасному залізничному транспорті. Показано доцільність розробки узагальненої моделі руху дизель-поїзда, системи керування та підтримки прийняття рішень машиністом на основі ГТК та інтелектуальних нейромережевих технологій.

2. Побудована узагальнена математична модель руху дизель-поїзда, яка дозволяє досліджувати: електромагнітні процеси у електроприводі під час розгону, руху та гальмування з врахуванням виляння, поперечних коливань та посмикування вагонів; сили, що виникають при взаємодії вагонів під час швидкісного руху, та можливості виникнення буксування. Це дозволило точніше описати процеси, які відбуваються в рухомому складі, провести дослідження щодо взаємного впливу основних видів коливань вагонів на процес руху поїзда, витрати енергії та комфорт пасажирів, а також протестувати закони керування.

3. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення, яке реалізує людино-машинну систему, котра дозволяє автоматизувати аналітичні перетворення ГТК при синтезі лінійних моделей у формі Бруновського для об'єктів, що описуються системами звичайних диференціальних рівнянь високого порядку. Синтезовані закони оптимального керування рухомим складом та розроблені складові бортової СППРМ: нейромережеві бази даних та знань, системи діагностики двигунів й прогнозування буксування. Програмне забезпечення розширило область застосування ГТК з об'єктів, що описуються 5-6 диференціальними рівняннями на об'єкти, які описуються системами, що містять десятки звичайних диференціальних рівнянь, та склала основний інструмент синтезу автоматизованої системи управління рухомим складом.

4. Запропоновано метод пошуку функцій перетворення між змінними лінійних моделей у формі Бруновського та змінними нелінійних моделей об'єкта керування на основі нейронних мереж, які здатні вирішувати завдання з декількома рішеннями, що дозволяє спростити пошук цих функцій та уникнути необхідності використання трудомістких переборних алгоритмів та (або) застосування евристичних підходів. Розроблено архітектури та алгоритми

функціонування мереж Хеммінга та безперервних нейронних мереж АРТ, що, на відміну від існуючих мереж, здатні запам'ятовувати та відновлювати зі своєї пам'яті декілька рішень. Це дозволило розширити область застосування запропонованих нейромереж та відкрило можливості для пошуку функцій перетворення між змінними нелінійних і лінійних моделей об'єкта керування, що мають дійсні коефіцієнти.

5. Розроблено лінійні математичні моделі руху дизель-поїзда за допомогою створеного програмного забезпечення, яке дозволяє здійснювати для нелінійних моделей перехід в інший фазовий простір, де вони стають лінійними та залишаються еквівалентними вхідним моделям. Такий перехід дозволив синтезувати закони оптимального керування тяговим рухомим складом, які підтверджені експериментальними дослідженнями та дозволили організувати рух дизель-поїздів згідно графіку з мінімальною витратою паливно-енергетичних ресурсів.

6. Створена бортова СППРМ, що на основі узагальненої моделі руху поїзда, розробленого програмного забезпечення та нейромережевих баз даних й знань, систем діагностики двигунів та прогнозування буксування дозволяє в реальних умовах швидкісного руху видавати машиністу закони керування дизель-поїздом. При цьому, пропоновані закони керування враховують графік руху та забезпечують мінімальну витрату паливо-енергетичних ресурсів, що в цілому направлено на поліпшення енергетичних характеристик тягового рухомого складу, а також створення комфортних умов поїздки пасажирів поїзда.

7. Розроблено для СППРМ: базу даних на основі N -направленої та багатосарової асоціативної пам'яті з керуючими нейронами; базу знань, котра здатна вхідним векторам ставити у відповідність одну або більшу кількість асоціацій, вирішувати завдання з декількома рішеннями, розпізнавати нову інформацію та донавчатися в процесі функціонування СППРМ; нейромережеву систему діагностики тягових двигунів обмоторених вагонів, що здійснює контроль перекошу фаз тягових двигунів; нейромережевий блок прогнозування виникнення і розвитку буксування колісних пар. В результаті створено реальне підґрунтя для впровадження отриманих теоретичних результатів в існуючі системи керування рухомим складом.

8. Проведено дослідження розробленої СППРМ та законів керування на математичних моделях і реальному об'єкті, результати якого підтвердили достовірність запропонованих рішень по оптимізації процесів керування рухом дизель-поїзда. Економія паливно-енергетичних ресурсів становить 5–8 %.

9. Результати роботи впроваджені Службою приміських пасажирських перевезень Одеської залізниці (м. Одеса), ПАТ завод «Перетворювач» (м. Запоріжжя), ДП «Пасажирське вагонне депо Харків-Сортувальний» (м. Харків), у навчальний процес Інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту (м. Харків) та у навчальний процес кафедри обчислювальної техніки та програмування НТУ «ХПІ» (м. Харків).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Заковоротный А.Ю. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный / [монография]. – Харьков : НТМТ, 2013. – 248 с.

Здобувачем розроблені наукові основи та методологія рішення задач моделювання й оптимізації процесів керування тяговим рухомим складом.

2. Заковоротный А.Ю. Синтез оптимальных законов управления движением дизель-поезда с помощью математической модели в форме Бруновского / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Н.В. Мезенцев // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків : УкрДАЗТ, 2010. – № 5-6 (84-85). – С. 7–13.

Здобувачем вирішена задача оптимального керування рухомим складом за допомогою принципу максимуму.

3. Заковоротный А.Ю. Линеаризация математической модели дизель-поезда с тяговым асинхронным приводом / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, В.И. Носков // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2011. – Вип. 17. – С. 26–36.

Здобувачем отримана форма лінійної моделі руху дизель-поїзда у канонічній формі Бруновського, за допомогою інволютивних розподілів ГТК.

4. Заковоротный А.Ю. Математическая модель в форме Бруновского для исследования и оптимизации электропривода с учетом параллельной работы двигателей / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, А.О. Нестеренко // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2011. – Вип. 36. – С. 61–70.

Здобувачем здійснено лінеаризацію математичної моделі руху дизель-поїзда, що враховує паралельну роботу двох еквівалентних приводів.

5. Заковоротный А.Ю. Дискретная нейронная сеть АРТ, использующие идеи иммунокомпьютинга / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2012. – Вип. 62 (968). – С. 52–63.

Здобувачем запропоновані зміни в архітектурі нейронної мережі АРТ, які підвищують її завадостійкість.

6. Заковоротный А.Ю. Нейронная сеть, использующая расстояние Хемминга для распознавания изображений на границах нескольких классов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2013. – Вип. 39 (1012). – С. 57–67.

Здобувачем запропонована архітектура та алгоритм роботи нейронної мережі, яка розпізнає зображення по відстані Хеммінга.

7. Заковоротный А.Ю. Нейронные сети Хемминга и Хебба, способные дообучаться / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, В.О. Бречко // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2013. – Вип. 19. – С. 30–45.

Здобувачем розроблені архітектури та алгоритми функціонування дискретних стабільно-пластичних нейронних мереж Хеммінга й Хебба.

8. Заковоротный А.Ю. Математическая модель для исследования и оптимизации электропривода дизель-поезда / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Электротехнические системы и комплексы.

– Магнітогорск : МГТУ, 2014. – № 1 (22). – С. 35–40.

Здобувачем розроблені математичні моделі руху дизель-поїзда.

9. Заковоротный А.Ю. Идентификация параметров тягового асинхронного привода дизель-поезда / А.Ю. Заковоротный, Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – Вип. 35 (1078). – С. 141–146.

Здобувачем запропоновано модель для ідентифікації параметрів приводу.

10. Заковоротный А.Ю. Автоматизация процессов преобразования нелинейных моделей к эквивалентным линейным в форме Бруновского / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – Вип. 62 (1104). – С. 22–37.

Здобувачем розроблено програмні засоби для автоматизації перетворення нелінійних моделей об'єктів к еквівалентним лінійним у формі Бруновського.

11. Заковоротный А.Ю. Архитектуры и алгоритмы функционирования нейронных сетей Хемминга и Хебба, способных дообучаться и распознавать новую информацию / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. – № 2. – С. 100–109.

Здобувачем вирішена задача донавчання нейронної мережі Хебба та проведені експериментальні дослідження її роботи.

12. Заковоротный А.Ю. Преобразование нелинейных систем управления к эквивалентным линейным в канонической форме Бруновского / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Электротехнические системы и комплексы. – Магнітогорск : МГТУ, 2014. – № 4 (25). – С. 8–14.

Здобувачем розроблено програмне забезпечення, що автоматизує перетворення нелінійних систем до еквівалентного лінійного вигляду.

13. Заковоротный А.Ю. Автоматизация символьных вычислений в процессе преобразования нелинейных моделей объектов к эквивалентным линейным / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Transaction of Azerbaijan National Academy of Sciences, Series of Physical-Technical and Mathematical Sciences: Informatics and Control Problems. – Baku, 2014. – Vol. XXXIV. – № 6. – С. 130–139.

Здобувачем виконаний програмний синтез лінійної моделі руху дизель-поїзда, що враховує паралельну роботу чотирьох тягових асинхронних двигунів.

14. Заковоротный А.Ю. Разработка стабильно-пластичных нейронных сетей на основе перцептрона / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Известия высших технических учебных заведений Азербайджана. – Баку, 2015. – Том 17. – № 2 (96). – С. 84–90.

Здобувачем розроблена архітектура та алгоритми функціонування стабільно-пластичної нейронної мережі на основі тришарового перцептрона.

15. Заковоротный А.Ю. Двухнаправленная многослойная нейронная сеть, хранящая цепочки ассоциативных изображений / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, // Вестник Ташкентского государственного технического университета. – Ташкент : ТГТУ, 2015. – № 3. – С. 3–10.

Здобувачем запропонована архітектура двонаправленої багат шарової нейронної мережі, яка здатна відновлювати ланцюги асоціацій.

16. Заковоротный А.Ю. Разработка обобщенной структуры интеллектуальной системы поддержки принятия решений машинистом дизель-поезда / А.Ю. Заковоротный, С.Ю. Леонов, Н.В. Мезенцев // Системы обработки інформації. – Харків : ХУПС, 2015. – Вип. 3 (128). – С. 6–12.

Здобувачем розроблена узагальнена структура інтелектуальної СППРМ.

17. Заковоротный А.Ю. Многослойная нейросетевая память, хранящая цепочки ассоциаций / В.Д. Дмитриенко, Р.П. Мигущенко, А.Ю. Заковоротный, В.О. Бречко // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2015. – Вип. 33. – С. 48–58.

Здобувачем запропоновані архітектура та алгоритми роботи багатопшарової пам'яті, що здатна зберігати ланцюги асоціацій.

18. Заковоротный О.Ю. Розробка N -направленої дискретної асоціативної пам'яті / О.Ю. Заковоротный // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – № 1 (54). – С. 101–108.

19. Заковоротный О.Ю. Розробка бази знань системи підтримки прийняття рішень машинистом на основі асоціативної пам'яті / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротный, В.І. Носков, В.С. Блиндюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – № 2. – С. 3–9.

Здобувачем розроблено архітектуру та принципи функціонування бази знань СППРМ на основі N -направленої асоціативної пам'яті.

20. Заковоротный О.Ю. Розробка багатонаправленої асоціативної пам'яті на основі дискретних нейронних мереж адаптивної резонансної теорії / О.Ю. Заковоротный // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Харків : ХУПС імені Івана Кожедуба, 2016. – Вип. 2 (47). – С. 91–96.

21. Заковоротный А.Ю. Разработка архитектуры и алгоритмов функционирования нейросетевой памяти с возможностью коррекции результатов / А.Ю. Заковоротный // Наука і техніка повітряних сил Збройних сил України. – Харків : ХУПС імені Івана Кожедуба, 2016. – Вип. 2 (23). – С. 145–149.

22. Заковоротный А.Ю. Стабильно-пластичные нейронные сети на основе перцептрона в задачах прогнозирования буксования / А.Ю. Заковоротный // Системы обработки інформації. – Харків : ХУПС імені Івана Кожедуба, 2016. – Вип. 6 (143). – С. 197–200.

23. Заковоротный А.Ю. Дискретная нейронная сеть АРТ с использованием расстояния Хемминга / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2016. – Вип. 21. – С. 29–40.

Здобувачем запропонована архітектура та алгоритми функціонування нейронної мережі.

24. Заковоротный А.Ю. Линейная математическая модель движения дизель-поезда / А.Ю. Заковоротный // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – № 1. – С. 39–46.

25. Заковоротный А.Ю. Метод поиска функций преобразования, связывающих переменные нелинейных и линейных моделей в ГТУ /

В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2016. – Вип. 44 (1216). – С. 14–30.

Здобувачем розроблений нейромережевий метод пошуку функцій перетворень у ГТК.

26. Заковоротный А.Ю. Расширение возможностей геометрической теории управления за счет автоматизации аналитических преобразований в пакете Matlab / А.Ю. Заковоротный // Вісник НТУУ «КП». – Київ : Век+, 2016. – № 64. – С. 76–83.

27. Zakovorotniy A.Y. Neural Networks Art: Solving Problems with Multiple Solutions and New Teaching Algorithm / V.D. Dmitrienko, A.Y. Zakovorotniy, S.Yu. Leonov, I.P. Khavina // The Open Neurology Journal. – Netherlands. – 2014. – № 8. – P. 15–21.

Здобувачем вирішена проблема деградації й відтворення класів при навчанні дискретних нейронних мережах АРТ.

28. Заковоротный А.Ю. Разработка нейронной сети АРТ с параметром сходства, симметричным относительно компонент 0 и 1 входных векторов и позволяющей определять несколько решений / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – Магнитогорск : МГТУ, 2012. – № 1. – С. 24–35.

Здобувачем розроблено нейронні мережі АРТ, що дозволяють визначити кілька рішень та використовують при цьому новий параметр подібності.

29. Заковоротный А.Ю. Техническая диагностика тягового асинхронного электропривода на основе нейронных сетей адаптивной резонансной теории / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Автоматизированные технологии и производства. – Магнитогорск : МГТУ, 2013. – Вып. 5. – С. 128–145.

Здобувачем розроблено інтелектуальну нейромережеву систему діагностики тягового електроприводу.

30. Заковоротный А.Ю. Нейросетевая ассоциативная память адаптивной резонансной теории для определения множества решений / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – Магнитогорск : МГТУ, 2014. – № 1. – С. 8–17.

Здобувачем розроблена архітектура та алгоритми роботи асоціативної пам'яті на АРТ, що дозволяє вирішувати завдання з декількома рішеннями.

31. Заковоротный А.Ю. Трехслойный перцептрон, способный дообучаться / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, В.О. Бречко // Автоматизированные технологии и производства. – Магнитогорск : МГТУ, 2014. – Вып. 6. – С. 12–21.

Здобувачем розроблено нейромережеву архітектуру перцептрона, який здатний донавчатися без втрат інформації, що була запам'ятована раніше.

32. Заковоротный А.Ю. Интеллектуальная система поддержки принятия решений машинистом с возможностью автоведения поезда / А.Ю. Заковоротный // Автоматизированные технологии и производства. – Магнитогорск : МГТУ, 2015. – Вып. 3 (9). – С. 40–45.

33. Заковоротный А.Ю. Автоматизация аналитических преобразований

геометрической теории управления / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Энергетические и электротехнические системы. – Магнитогорск : МГТУ, 2015. – Вып. 2. – С. 208–222.

Здобувачем автоматизовано перетворення моделей руху рухомого складу до еквівалентних лінійних моделей.

34. Заковоротный А.Ю. Разработка дискретной многослойной ассоциативной памяти с управляющими нейронами / А.Ю. Заковоротный // Автоматизированные технологии и производства. – Магнитогорск : МГТУ, 2016. – Вып. 1 (11). – С. 4–9.

35. Заковоротный А.Ю. Новые архитектуры и алгоритмы обучения нейронных сетей адаптивной резонансной теории [Электронный ресурс] / А.Ю. Заковоротный // Сетевой научно-практический журнал «Научный результат». Серия «Информационные технологии». – Т. 1, № 1 (1), 2016. – С. 4–11. – Режим доступа: <http://research-result.ru/journal/information/annotation/25/>.

36. Заковоротный А.Ю. Линеаризация модели тягового электропривода методами геометрической теории управления / А.Ю. Заковоротный // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов. – Уфа : УГНТУ, 2016. – С. 55–58.

37. Заковоротный А.Ю. Геометрическая теория управления в задачах оптимизации энергозатрат тягового подвижного состава [Электронный ресурс] / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Сетевой научно-практический журнал «Научный результат». Серия «Информационные технологии». – Т. 1, № 4 (4), 2016. – С. 4–15. – Режим доступа: <http://research-result.ru/journal/information/annotation/888/>.

Здобувачем вирішені дві задачі оптимального керування приводом.

38. Пат. на винахід 108009 Україна, МПК G06K 9/00. Нейромережевий пристрій для розпізнавання та класифікації зображень на границі декількох класів / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, І.П. Хавіна (Україна); заявник та володар патенту НТУ «ХПІ». – № а 2013 08531; заявл. 08.07.13; опубл. 10.03.15, бюл. № 5. – 7 с.

Здобувач запропонував структуру нейронної мережі та алгоритм її роботи для СППРМ.

39. Пат. на винахід 108712 Україна, МПК G06G 7/60. Пристрій багатосарової асоціативної пам'яті з керуючими нейронами / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, І.П. Хавіна, В.О. Бречко (Україна); заявник та володар патенту НТУ «ХПІ». – № а 2014 04330; заявл. 22.04.14; опубл. 25.05.15, бюл. № 10. – 11 с.

Здобувачем розроблено структуру нейронної мережі та принцип її функціонування для СППРМ.

40. Пат. на винахід 108947 Україна, МПК G06G 7/60. Пристрій багатосарової двонаправленої асоціативної пам'яті / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, І.П. Хавіна, В.О. Бречко (Україна); заявник та володар патенту НТУ «ХПІ». – № а 2014 02402; заявл. 11.03.14; опубл. 25.06.15, бюл. № 12. – 8 с.

Здобувач розробив структуру нейронної мережі та алгоритм її роботи для СППРМ.

41. Пат. на винахід 108949 Україна, МПК G06G 7/60. Пристрій N-направленої асоціативної пам'яті / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, В.О. Бречко (Україна); заявник та володар патенту НТУ «ХП». – № а 2014 02642; заявл. 17.03.14; опубл. 25.06.15, бюл. № 12. – 8 с.

Здобувачем розроблено нейромережеву структуру пристрою та алгоритми його функціонування.

42. Пат. на корисну модель 62606 Україна, МПК G06G7/00. Пристрій безперервної двоспрямованої асоціативної пам'яті / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, І.О. Белєвцов (Україна); заявник та володар патенту НТУ «ХП». – № u 2010 15230; заявл. 17.12.10; опубл. 12.09.11, бюл. № 17. – 11 с.

Здобувач запропонував структуру пристрою та алгоритм його роботи.

43. Пат. на корисну модель 68375 Україна, МПК G06K9/00. Пристрій розпізнавання й класифікації образів / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, І.І. Котов (Україна); заявник та володар патенту НТУ «ХП». – № u 2011 10107; заявл. 16.08.11; опубл. 26.03.12, бюл. № 6. – 6 с.

Здобувачем розроблено структуру пристрою та алгоритм його роботи.

44. Пат. на корисну модель 74414 Україна, МПК G06G 7/60. Нейромережевий пристрій для розпізнавання та класифікації динамічних процесів / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний (Україна); заявник та володар патенту НТУ «ХП». – № u 2012 04749; заявл. 17.04.12; опубл. 25.10.12, бюл. № 20. – 4 с.

Здобувач запропонував структуру пристрою та алгоритм його роботи.

45. Пат. на корисну модель 93337 Україна, МПК G06G 7/00. Нейромережевий пристрій класифікації динамічних процесів / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний (Україна); заявник та володар патенту НТУ «ХП». – № u 2014 04567; заявл. 28.04.14; опубл. 25.09.14, бюл. № 18. – 9 с.

Здобувачем розроблено структуру пристрою та алгоритм його роботи.

46. Пат. на корисну модель 100498 Україна, МПК G06K 9/00. Пристрій багатонаправленої нейромережевої пам'яті / О.Ю. Заковоротний (Україна); заявник та володар патенту НТУ «ХП». – № u 2015 01554; заявл. 23.02.15; опубл. 27.07.15, бюл. № 14. – 8 с.

47. Комп'ютерна програма «Комп'ютерна програма для дослідження нейромережевої багатошарової двонаправленої асоціативної пам'яті» / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, В.О. Бречко // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 57996. – Зареєстр. в Держ. службі інтелектуальної власності України 05.01.15.

Здобувачем розроблено програмні модулі, що реалізують нейромережеву пам'ять.

48. Комп'ютерна програма «Комп'ютерна програма інтелектуального розпізнавання зображень» / О.Ю. Заковоротний, Д.О. Пеліх, М.С. Шаповалов // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 66142. – Зареєстр. в Держ. службі інтелектуальної власності України 17.06.16.

Здобувачем розроблено алгоритми та програмне забезпечення.

49. Заковоротный А.Ю. Синтез оптимальных законов управления движением дизель-поезда с тяговым асинхронным приводом / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, М.В. Мезенцев, А.П. Попенко // Збірник матеріалів конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті». – Алушта, 2010. – № 4 (додаток). – С. 8.

Здобувачем за допомогою принципу максимуму вирішена задача оптимального керування тяговим рухомих складом.

50. Заковоротный А.Ю. Синтез линейной математической модели движения дизель-поезда ДЭЛ-02 / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту». – Херсон : ХНТУ, 2011. – Т. 1. – С. 394–399.

Здобувачем розроблена лінійна математична модель дизель-поїзда, що еквівалентна системі нелінійних диференціальних рівнянь десятого порядку.

51. Заковоротный А.Ю. Система поддержки принятия решений для управления динамическим объектом / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, А.О. Нестеренко // Сборник трудов II Международной научно-технической конференции «Компьютерные науки и технологии». – Белгород : ООО «ГиК», 2011. – С. 184–188.

Здобувачем розроблено структуру СППРМ, що допомагає керуванню динамічним об'єктом.

52. Заковоротный А.Ю. Математическое моделирование продольных колебаний дизель-поезда с тяговым асинхронным двигателем / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, В.И. Носков, А.О. Нестеренко // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Системний аналіз та інформаційні технології SAIT 2011». – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – С. 82.

Здобувачем проведено дослідження по виявленню коливання зусиль, що виникають між вагонами рухомого складу під час його руху.

53. Заковоротный А.Ю. Синтез математической модели в форме Бруновского для оптимизации функционирования электропривода с учетом параллельной работы двигателей / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, А.О. Нестеренко // Тези доповіді XI Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатики та моделювання». – Ялта; Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – С. 21.

Здобувачем розроблено модель, що дозволяє досліджувати й оптимізувати процеси керування рухомих складом.

54. Заковоротный А.Ю. Нейросетевая диагностика тягового асинхронного электропривода / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Тези доповіді XX Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – С. 14.

Здобувач запропонував ієрархічну нейронну мережу АРТ, що дозволяє здійснювати контроль динамічних характеристик електропривода.

55. Заковоротный А.Ю. Нейросетевая память для хранения множественных ассоциаций / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Інтелектуальні системи

прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту». – Херсон : ХНТУ, 2012. – С. 348–350.

Здобувачем розроблено структуру нейронної мережі АРТ, що володіє можливістю відновлення зі своєї пам'яті множини асоціативних зображень.

56. Заковоротный А.Ю. Ассоциативная нейронная сеть АРТ / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, В.А. Бречко // Сборник трудов Международной конференции «Прикладная математика, управление и информатика». – Белгород : ИД «Белгород», 2012. – Т. 1. – С. 115–119.

Здобувачем розроблено алгоритми роботи асоціативної мережі АРТ.

57. Заковоротный А.Ю. Дискретные нейронные сети адаптивной резонансной теории, использующие новые алгоритмы обучения и параметры сходства / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології, економіка і право: стан і перспективи розвитку ІТЕП-2013». – Чернівці : Книга, 2013. – С. 68–69.

Здобувачем розроблено архітектура й алгоритми роботи дискретних мереж АРТ, що використовують при розпізнаванні нові параметри подібності.

58. Заковоротный А.Ю. Нейронная сеть для решения задач с несколькими решениями / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Системний аналіз та інформаційні технології SAIT 2014». – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – С. 203.

Здобувачем виконано синтез стабільно-пластичних нейронних мереж Хеммінга, що здатні вирішувати завдання з декількома рішеннями.

59. Заковоротный А.Ю. Линейная математическая модель дизель-поезда для исследования режимов тяги и буксования / А.Ю. Заковоротный // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Образование, наука, транспорт в XXI веке: опыт, перспективы, инновации». – Самара; Оренбург : СамГУПС, ОрИПС, 2014. – С. 17–24.

60. Заковоротный А.Ю. Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений машинистом / А.Ю. Заковоротный // Материалы V Международной научно-практической конференции «Образование, наука, транспорт в XXI веке: опыт, перспективы, инновации». – Самара; Оренбург : СамГУПС, ОрИПС, 2015. – С. 4–11.

61. Заковоротный А.Ю. Автоматизация символьных вычислений в геометрической теории управления при синтезе линейных моделей / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Матеріали ХХІІ Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика 2015». – Одеса : ТЕС, 2015. – С. 89–91.

Здобувачем отримано лінійну математичну модель руху дизель-поїзда, яка враховує паралельну роботу чотирьох тягових асинхронних двигунів.

62. Заковоротный А.Ю. Розробка нейромережевої N -направленої дискретної асоціативної пам'яті / А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев // Матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі». – Кривий Ріг : ДВНЗ «Криворізький національний університет», 2016. – С. 97–100.

Здобувачем розроблено архітектура та алгоритми функціонування багатонаправленої асоціативної пам'яті.

63. Заковоротный А.Ю. Использование нейросетевой N -направленной дискретной многоуровневой ассоциативной памяти в системах поддержки принятия решений машинистом / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев // Тези доповіді XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків : НТУ «ХП», 2016. – С. 130.

Здобувачем розроблено архітектури та алгоритми навчання й функціонування нейромережевої бази знань СППРМ.

64. Заковоротный А.Ю. Оптимізація тягового електроприводу за допомогою геометричної теорії керування / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, М.В. Мезенцев // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Системний аналіз та інформаційні технології SAIT 2016». – Київ : НТУУ «КП», 2016. – С. 82.

Здобувачем розроблено приклад лінеаризації моделі поїзда, що враховує основні види коливань вагонів та паралельну роботу тягових двигунів.

65. Заковоротный А.Ю. Стабильно-пластичные нейронные сети, использующие расстояние Хемминга / В.Д. Дмитриенко, С.Ю. Леонов, А.Ю. Заковоротный, Г.В. Гейко // Матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Одеса – Хмельницький : ХНУ, 2016. – С. 119.

Здобувачем розроблена стабільно-пластична нейронна мережа Хеммінга, яка здатна не тільки донавчатися, а й розпізнавати нову інформацію.

66. Заковоротный О.Ю. Проблемы автоматизации процессов керування тяговим рухомим складом / В.Д. Дмитрієнко, В.І. Носков, О.Ю. Заковоротний // Матеріали XXIII Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика 2016». – Суми : СДУ. – 2016. – С. 104–105.

Здобувачем розроблені засоби оптимізації динаміки рухомих об'єктів з використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

67. Заковоротный А.Ю. Автоматизация аналитических преобразований геометрической теории управления в пакете Matlab [Електронний ресурс] / А.Ю. Заковоротный // Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами». – Київ : НУХТ, 2016. – С. 38–39. – Режим доступу: http://nuft.edu.ua/page/51adaed39c2a2/files/3_Internet_konf.pdf

АНОТАЦІЇ

Заковоротний О. Ю. Синтез автоматизованої системи управління рухомим складом на основі геометричної теорії керування та нейронних мереж. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2017.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми розробки бортової системи підтримки прийняття рішень машиністом, що створена на основі узагальнених математичних моделей та засобів оптимізації динаміки рухомих об'єктів з використанням нових методів та програмного забезпечення, а також нової технології обробки інформації на основі стабільно-пластичних нейронних мереж та нових моделей асоціативної пам'яті, яка створює теоретичну передумову розробки автоматичних систем керування рухомим складом та дозволяє поліпшити його енергетичні характеристики.

Розроблено модель дизель-поїзда, що враховує основні види коливань вагонів та розподіл сил взаємодії між ними, а також паралельну роботу тягових двигунів обмоторених вагонів, що адекватно відображає процеси, які протікають на реальному об'єкті. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення, що реалізує людино-машинну систему, яка дозволяє автоматизувати аналітичні перетворення геометричної теорії керування при синтезі моделей у формі Бруновського. На основі нейронних мереж, що здатні вирішувати завдання з декількома рішеннями, розроблено новий метод пошуку функцій переходу між змінними нелінійних і лінійних моделей у формі Бруновського. Розроблені стабільно-пластичні нейронні мережі Хеммінга, Хебба та мережі на основі перцептрона, здатні розпізнавати нову інформацію й донавчатися в процесі функціонування, та модифікацію нейронної мережі Хеммінга, що здатна визначати декілька рішень. Розроблено структуру та складові бортової системи підтримки прийняття рішень, що дозволяє в реальних умовах експлуатації рухомого складу й поточній зміні дорожньої обстановки видавати машиністу закон керування, при якому дотримується графік руху за мінімальних витрат паливо-енергетичних ресурсів. Проведені дослідження на математичних моделях і реальному об'єкті, результати яких підтверджують правильність запропонованих рішень, методів та алгоритмів.

Ключові слова: автоматизована система управління, геометрична теорія керування, система підтримки прийняття рішень, автоматизація аналітичних перетворень, програмне забезпечення.

Заковоротный А. Ю. Синтез автоматизированной системы управления подвижным составом на основе геометрической теории управления и нейронных сетей. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2017.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы разработки бортовой системы поддержки принятия решений машинистом, созданной на основе обобщенных математических моделей и средств оптимизации динамики подвижных объектов с использованием новых методов и программного обеспечения, а также новой технологии обработки информации на основе стабильно-пластичных нейронных сетей и новых моделей ассоциативной памяти, что создает теоретическую предпосылку

разработки автоматических систем управления подвижным составом и позволяет улучшить его энергетические характеристики.

Разработана модель дизель-поезда, учитывающая основные виды колебаний вагонов и распределение сил взаимодействия между ними во время движения, а также параллельную работу тяговых приводов, которая адекватно отражает процессы, протекающие на реальном объекте. Разработано программное обеспечение, реализующее человеко-машинную систему, которая позволяет автоматизировать аналитические преобразования геометрической теории управления при синтезе моделей в форме Бруновского для объектов, описываемых системами обыкновенных дифференциальных уравнений высокого порядка с несколькими управлениями. На основе нейронных сетей адаптивной резонансной теории, способных решать задачи с несколькими решениями, предложен новый метод поиска функций преобразования между переменными линейных и нелинейных моделей. С помощью принципа максимума решены две задачи оптимального управления тяговым подвижным составом: максимального быстродействия и минимизации взвешенной линейной комбинации времени и расходов квадрата управления, что позволяет, с одной стороны, получить для каждого участка пути законы управления, которые определяют минимально необходимое время для преодоления перегона, а с другой стороны, получить законы управления, обеспечивающие график движения и минимизацию расхода топливно-энергетических ресурсов. Разработаны стабильно-пластичные нейронные сети Хемминга, Хебба и сети на основе перцептрона, способные распознавать новую информацию и дообучаться в процессе своего функционирования, которые позволяют использовать их как альтернативу дискретным нейронным сетям адаптивной резонансной теории. Разработана бортовая система поддержки принятия решений, которая позволяет в реальных условиях скоростного движения выдавать машинисту закон управления поездом, при котором соблюдается график движения при минимальных затратах топливно-энергетических ресурсов. Для реализации базы данных системы поддержки принятия решений машинистом разработана N -направленная нейросетевая ассоциативная память, которая способна восстанавливать по входному вектору множество из N векторов, ассоциативных к входной информации, и двунаправленная многослойная дискретная ассоциативная память с управляющими нейронами, которая способна восстанавливать цепочки ассоциаций и корректировать результаты с учетом дополнительной информации. Создана база знаний, позволяющая запоминать несколько равноценных решений о законе управления поездом для текущего перегона, нейросетевая система диагностики тяговых двигателей и система, позволяющая прогнозировать возникновение и подавлять развитие буксования колесных пар во время движения. Приведены результаты экспериментальных исследований интеллектуальной системы поддержки принятия решений машинистом и законов оптимального управления подвижным составом, которые подтвердили достоверность предложенных решений по автоматизации процессов управления движением дизель-поезда.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, геометрическая теория управления, система поддержки принятия решений, автоматизация аналитических преобразований, программное обеспечение.

Zakovorotniy O. Y. Synthesis of automated rolling stock control system on the basis of geometric control theory and neural networks. Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Science on Specialty 05.13.07 – Automation of Control Processes. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2017.

The dissertation is devoted to solving scientific and applied problems of increasing energy characteristics of traction rolling stock, traction asynchronous drive through the development and introduction of new onboard intellectual decision support system of machinist that is based on more accurate models and optimize dynamics tools, using new methods and specialized software and new technologies of information processing based on stable and plastic neural networks and new models of associative memory, which creates theoretical precondition for developing of automatic control systems of high-speed rolling stock.

Developed a comprehensive diesel-train model that takes into account the principal vibrations of the rolling stock and the distribution of forces of interaction between them, as well as parallel performance of traction drive of wagons with motors that adequately reflects the processes that occur on the real object. Developed specialized software that realizes the man-machine system that automates the conversion of analytical geometric control theory in the synthesis models to the Brunovsky form. Based on the neural networks that can solve problems with multiple solutions, developed a new method of search switching functions between the variables in the form of linear models Brunovsky and variables of nonlinear models control object. Developed stable-flexible Hamming neural networks, Hebb and other networks based on Perceptron, that can recognize new information and studying during its performance and modification Hamming neural network, capable identify several solutions. Has developed structure and components of the onboard intellectual decision support system that allows the actual use of the rolling stock and when happening currently changing road conditions, system can give for machinist new control laws under which adheres to a schedule for the least cost fuel and energy resources. Conducted experimental investigations on mathematical models and real object that confirming the correctness of the proposed solutions, methods and algorithms.

Keywords: automated control system, geometric control theory, decision support system, automation of analytical transformations, software.



Підп. до друку 21.03.2017 р. Формат 60x84 1/16. Папір Сору Рарег.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 1,8.
Наклад 120 прим.

Надруковано у друкарні ФОП Тарасенко В.П.
Свідоцтво № 24800170000043751 від 21.02.2002 р.
61124, м. Харків, вул. Зернова, 6/267.
Тел./факс: (0572) 52-82-11, (097) 273-11-77