

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

**Денис Ігор Володимирович**

УДК 629.424.1.001.76

**ПОКРАЩЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ГІБРИДНОГО  
ТЕПЛОВОЗУ З ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИМ ПРИВОДОМ**

05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електроенергетики, електротехніки та електро-механіки Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Буряковський Сергій Геннадійович**,  
Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія»  
Національний технічний університет «ХПІ»,  
м. Харків, директор.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Капіца Михайло Іванович**,  
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка  
В. Лазаряна, кафедра «Локомотиви», завіду-  
вач кафедри;

кандидат технічних наук, доцент  
**Черняк Юрій Васильович**,  
Державний університет інфраструктури та  
технологій кафедра «Тягового рухомого  
складу залізниць», доцент кафедри

Захист відбудеться **«05» грудня 2019 р. о 10<sup>00</sup> годині** на засіданні спеціалізо-ваної вченої ради К 26.820.01 при Державному університеті інфраструктури та техно-логій за адресою: 03049, м. Київ, вул. І. Огієнка, 19, ауд. №305 а.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Державного універ-ситету інфраструктури та технологій за адресою: 03049, м. Київ, вул. І. Огієнка, 19 або на сайті за адресою <http://duit.edu.ua> (Наука – Спеціалізовані вчені ради)

Автореферат розісланий **«01» листопада 2019 р.**

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
К 26.820.01, к.т.н., доцент



В. М. Молчанов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Ефективне використання паливно-енергетичних ресурсів є однією з найважливіших задач, що стоять перед економікою України. Закон України «Про енергозбереження» визначає енергетичну ефективність економіки одним з головних стратегічних орієнтирів довгострокової державної енергетичної політики. Залізничний транспорт є одним з найбільших споживачів енергоресурсів в країні. Енергетична ефективність в сучасних умовах є найважливішим фактором підвищення конкурентоспроможності українських залізниць на внутрішньому і міжнародному ринку транспортних послуг. У 2010 році постановою Кабінету Міністрів України була затверджена Транспортна стратегія України на період до 2020 року, метою якої, зокрема, є оптимізація енергоспоживання при безумовному виконанні послуг з перевезення вантажів і збереженні енергобезпеки підприємства АТ «Українська залізниця». Основна частка витрат паливно-енергетичних ресурсів в компанії припадає на тягу поїздів. Сьогодні це 82% всього обсягу споживання компанією електроенергії і 90% дизельного палива. Тому і упор в енергозбереженні зроблений, передусім, на основний вид діяльності – перевізний процес. У зв'язку з цим питання підвищення енергоефективності є досить актуальним для АТ «Українська залізниця».

Тепловози ЧМЕЗ складають 97% усього парку маневрових локомотивів української залізниці. Окрім маневрової роботи на станціях ці тепловози часто використовуються для вивізної роботи, а також у приміському русі. В умовах запровадження швидкісного руху особливого значення набуває оптимізація режимів ведення даних типів поїздів ділянками. В умовах підвищення швидкості проходження ділянки слід не забувати про витрати паливно-енергетичних ресурсів. Як показує світовий досвід запровадження нових типів локомотивів, гібридна силова установка дозволяє значною мірою знизити витрати палива локомотивом, що й було перевірено у роботі за допомогою імітаційного моделювання.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту з урахуванням положень «Концепції розвитку транспортно-залізничного комплексу України на середньо терміновий період до 2020 року» (Наказ Державної адміністрації залізничного транспорту №764 від 05.11.2001р).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є зменшення витрати палива тепловозом шляхом розробки гібридної силової установки.

Для досягнення зазначеної мети поставлено наступні задачі:

1. Проведення теоретичного узагальнення наукових робіт і практичних розробок у частині спрямування розвитку й сучасного технічного рівня існуючих систем керування тепловозів.

2. Розробка та створення імітаційної моделі тепловоза, розрахунок індикаторної діаграми дизеля K6S310DR та отримання неперервних залежностей тиску та сили, що діють на поршень, в залежності від кута повороту колінчастого

валу.

3. Розробка імітаційної моделі роботи тепловоза з використанням реального профілю шляху ділянки Харків–Мерефа.

4. Розробка функціональної схеми гібридного тепловозу, функціональних схем накопичувачів енергії, проведення ідентифікації параметрів вентиляно-індукторного двигуна ДВІ-165 та отримання його математичної моделі.

5. Розробка імітаційної моделі роботи гібридного тепловоза з використанням реального профілю шляху колії ділянки Харків–Мерефа та дослідження зміни витрат пального.

6. Виконання синтезу двох типів регуляторів швидкості (модального та на основі нечіткої логіки) вентиляно-індукторного приводу та створення імітаційної моделі вентиляно-індукторного приводу.

7. Розробка узагальненої моделі роботи гібридного тепловозу з вентиляно-індукторним приводом і нечітким регулятором та дослідження зміни витрати пального.

8. Розробка та створення реальної фізичної моделі системи колісна пара – вентиляно-індукторний двигун для підтвердження адекватності теоретичних досліджень.

**Об'єктом дослідження** є процеси керування маневровим тепловозом з використанням гібридної силової установки.

**Предметом дослідження** є моделі роботи гібридного маневрового тепловозу та методи синтезу мікропроцесорних систем автоматичного керування вентиляно-індукторним електроприводом.

**Методи дослідження.** Теоретичною базою виконаних досліджень є фундаментальні положення теорії автоматичного керування. Методи узагальненої теорії електромеханічних перетворювачів енергії використовувалися для розрахунку електромеханічних систем; метод кінцевих елементів та комбінований коло-польовий метод – для розрахунку магнітного поля електромеханічних перетворювачів енергії; метод Чина-Хронса-Ресвіка – для синтезу регулятора швидкості; методи наближення функцій – для апроксимації дискретних експериментальних даних цифрового моделювання; сучасні системи комп'ютерної математики – для обчислення значення параметрів систем керування, їх синтезу та дослідження ефективності роботи.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

– удосконалено імітаційну модель дизельного двигуна, що враховує особливості поведінки його індикаторної діаграми при чотиритактному режимі його роботи;

– удосконалено імітаційні моделі акумуляторної батареї та іонистора, робота яких основана на зарядно-розрядних характеристиках, що характеризуються нелінійностями;

– отримали подальший розвиток математичні моделі вентиляно-індукторних двигунів як об'єкту керування з урахуванням особливостей роботи в поєднанні з гібридною системою;

– вперше розроблено імітаційну модель роботи гібридного тепловоза з використанням реального профілю шляху колії ділянки Харків–Мерефа та прове-

дено дослідження змінити витрати пального в залежності від максимальної швидкості та часу руху по перегону;

- отримали подальший розвиток методи синтезу регуляторів швидкості, які дозволили враховувати вплив нелінійних властивостей об'єкта керування та підвищити показники якості регулювання;

- отримала подальший розвиток імітаційна модель роботи гібридного тепловозу на базі вентиляно-індукторного приводу з різними типами нелінійних регуляторів швидкості;

- отримала подальший розвиток реальна фізична модель системи колісна пара – вентиляно-індукторний двигун.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному:

- розроблено методику визначення параметрів системи керування гібридним тепловозом з вентиляно-індукторним приводом, що дозволяє реалізувати вимоги «Правил технічної експлуатації залізниць України» до тягового рухомого складу;

- для дизельних двигунів та накопичувачів енергії розроблено методику створення їх імітаційних моделей, що враховують нелінійність таких елементів;

- в дослідному зразку системи колесо – тяговий двигун реалізовано систему автоматичного керування на базі нечіткої логіки з використанням розроблених математичних моделей.

Результати, які отримані в ході виконання дисертаційної роботи, впроваджено в ТОВ «ФТС» (м. Київ) та ТОВ «ТРАНС-ГРУП ПЛЮС (м. Кропивницький), у навчальний процес в Інституті перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту (м.Харків) та в НТУ «ХПІ».

**Особистий внесок здобувача.**

Усі основні результати дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Особистий внесок автора полягає у плануванні та проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів, розробці наукових положень, технічних рішень, рекомендацій та висновків. У роботах виконаних у співавторстві особистий внесок автора наступний: [1,6] - запропонував конфігурацію гібридної системи (на базі вентиляно-індукторного приводу) для маневрового тепловозу та обґрунтував доцільність їх запровадження; [2] - запропонував шляхи модернізації маневрових локомотивів та обґрунтував доцільність їх запровадження; [3] - дослідив роботу систем керування вентиляно-індукторним електроприводом на математичній моделі та провів аналіз отриманих результатів; [4] - провів аналіз режимів роботи маневрового тепловоза; [5] - провів аналіз роботи нечіткого регулятора швидкості вентиляно-індукторного приводу на фізичній моделі; [7] - розробив узагальнену імітаційну модель роботи маневрового тепловозу; [8] - запропонував конфігурацію гібридної системи для маневрового тепловозу та проведено порівняльний аналіз двох систем.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались та обговорювались на міжнародних конференціях та семінарах: «Проблеми перетворення електроенергії на електричному транспорті» щорічний семі-

нар НАН України (Харків, 2013-2015); «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018» (Харків, 2018); «Проблеми енергосурсозбереження в електричних системах. Наука, освіта і практика» (Кременчук, 2018).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 7 наукових працях, з них: 5 – у наукових фахових виданнях України (4 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз), 3 – у періодичних фахових виданнях (Scopus та Web of Science), 3 – у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації двома мовами, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг дисертації складає 187 сторінок і містить 116 рисунків та 13 таблиць по тексту, 49 рисунків і 1 таблиця на 32 окремих сторінках, 92 найменування використаних джерел на 11 сторінках, 3 додатки на 13 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність дослідження, сформульована мета і визначені основні задачі роботи, дана характеристика наукової новизни і обґрунтована практична цінність отриманих результатів, показано зв'язок роботи з Державними програмами і бюджетними темами.

В **першому розділі** проведено аналіз тенденцій розвитку тепловозобудівної галузі на вітчизняній залізниці та за кордоном, обґрунтовано напрямок досліджень.

Виробнича діяльність експлуатаційних і ремонтних підприємств АТ «Українська залізниця», а також інших виробничих структур підтверджує потребу в екологічних локомотивах малої потужності для виконання легких маневрових і господарських робіт.

Аналіз ходу реконструкції засобів тяги на залізницях світу показує, що полігон залізниць, який обслуговується тягою тепловоза, і обсяг перевезень, що виконується тепловозами на залізницях світу, займають провідне місце. Незважаючи на те, що в провідних країнах світу процес впровадження прогресивних видів тяги завершений або близький до завершення (що призвело до деякого зниження випуску тепловозів в окремих країнах), потреба в тепловозах в світі буде залишатися стійкою. Крім того, більшість країн світу будуть змушені перейти до заміни і модернізації раніше випущених застарілих тепловозів. Все це змушує провідні зарубіжні тепловозобудівні фірми інтенсивно працювати по створенню інших конструкцій тепловозів.

Результатом світової тенденції з підвищення енергоефективності є необхідність переходу на більш екологічні та надійні види маневрового тягового рухомого складу. Вони є одним із важливих виконавчих елементів станцій залізниць, що забезпечують безперебійну її роботу. З урахуванням вище сказаного створення гібридних установок для маневрової тяги з перспективними системами керування є одною з актуальних науково-технічних проблем залізничного транспорту.

Аналіз альтернативних варіантів приводу нового покоління показав: реальною можливістю створити конкурентоспроможний транспортний засіб є використання комбінованої енергоустановки. Така установка, що складається з двигуна внутрішнього згоряння, генератора, тягового електроприводу і накопичувача енергії, вдало поєднує позитивні властивості окремих вузлів. Тому на сьогоднішній день існує пріоритет – комбінована установка з тепловим двигуном. Подібне рішення дозволяє значно скоротити витрати пального, так як більша частина маневрової роботи буде здійснюватися на живленні від тягової акумуляторної батареї, і забезпечувати високу екологічну чистоту локомотива.

В кінці розділу приведено обґрунтування вибору мети дисертаційної роботи і сформульовані задачі дослідження.

**Другий розділ** присвячений розробці математичної моделі роботи маневрового тепловозу ЧМЕЗ та аналізу отриманих результатів.

Дизель-генераторна установка разом з електричною частиною об'єкта дослідження складається з таких основних конструкційних елементів: пульта керування, дизеля з регулятором кількості обертів колінчастого валу, тягового генератора постійного струму незалежного збудження та тягового електричного приводу. Структурна схема такого об'єкта дослідження наведена на рисунку 1.

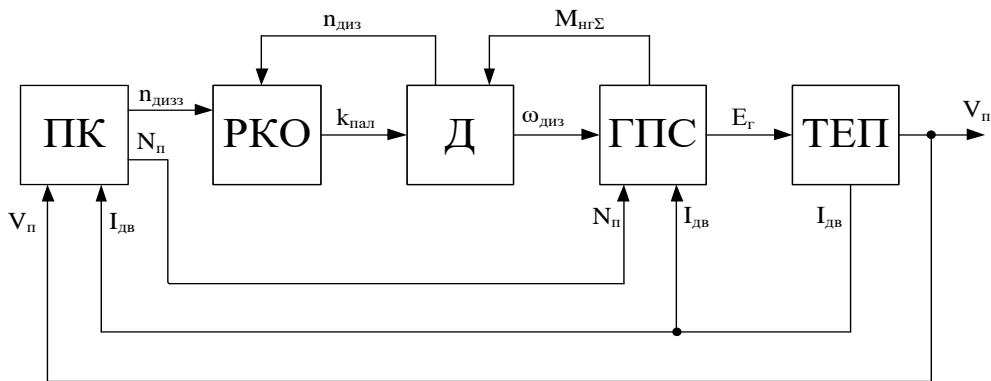


Рисунок 1 – Структурна схема моделі тепловозу ЧМЕЗ: ПК – пульт керування; РКО – регулятор кількості обертів дизеля; Д – дизель; ГПС – генератор постійного струму зі збуджувачем; ТЕП – тяговий електропривод

Вхідними параметрами для блоку ПК є швидкість поїзда  $V_{п}$  та струм двигуна  $I_{дв}$ , від величин яких залежить номер позиції контролера машиніста  $N_{п}$  та задана кількість обертів дизелю  $n_{дизз}$ , яка є вхідною величиною для блоку РКО. В залежності від  $n_{дизз}$  та  $n_{диз}$  РКО визначає необхідну кількість палива  $k_{пал}$ . На основі  $k_{пал}$  та моменту навантаження  $M_{нгΣ}$  ГПС отримує від Д значення  $\omega_{диз}$ . Величина  $E_{г}$ , що є вхідним параметром блоку ТЕП, розраховується ГПС в залежності від  $N_{п}$  та  $I_{дв}$ . На виході ТЕП формується значення  $V_{п}$ .

Пульт машиніста тепловозу ЧМЕЗ має 8 позицій зміни напруги на тягових двигунах та дві позиції послаблення поля. Змодельований пульт керування здійснює переключення позицій контролера машиніста в залежності від двох координат, а саме: струму двигунів та швидкості руху поїзда.

Для підтримання постійної частоти обертання валу в умовах змінного навантаження на дизель потрібен спеціальний регулятор, що автоматично керує

паливними насосами. Об'єднаний регулятор був представлений як ПІ-регулятор швидкості обертання колінчастого валу дизеля, вихідною величиною якого є кількість палива, що необхідно подати до циліндру.

На тепловозах ЧМЕЗ встановлений чотиритактний дизель K6S310DR з вертикальним розміщенням циліндрів та водяним охолодженням. В основу імітаційної моделі дизеля покладена індикаторна діаграма його роботи, яка представлена на рисунку 2.

Для подальшого створення моделі дизелю користування діаграмою у осях  $P$  та  $V$  є досить незручним, тому наведену діаграму перетворено у діаграму в осях  $F$  та  $S$ , де  $F$  – сила, що діє на поршень,  $S$  – переміщення поршня.

Отримані у результаті розрахунку значення для побудови індикаторної діаграми були апроксимовані неперервними функціями для подальшого їх використання у створенні імітаційної моделі. Апроксимація була виконана методом інтерполяції з використанням інтерполюючої функції наступного вигляду:

$$\varphi(x) = \varphi(\vec{C}, x) = C_0\varphi_0(x) + C_1\varphi_1(x) + \dots + C_m\varphi_m(x) = \sum_{k=0}^m C_k\varphi_k(x), \quad (1)$$

де  $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)$  – базисні функції;  $C_k$  – коефіцієнти інтерполяції.

Для моделювання дизелю була використана сумарна сила, що реалізується, в залежності від кута повороту колінчастого валу.

На тепловозі встановлені тяговий десятиполюсний генератор постійного струму незалежного збудження TD-802 та тяговий двигун постійного струму послідовного збудження TE-006, які також були змодельовані у середовищі Matlab. Блок, що моделює тяговий електропривод включає в себе, окрім тягового електродвигуна, блоки, що моделюють рух потяга ділянкою та гальмування потяга. Модель блоків опору руху поїзда виконана за емпіричними формулами для локомотива та вогнів. У якості профілю шляху використаний профіль ділянки Харків – Мерефа.

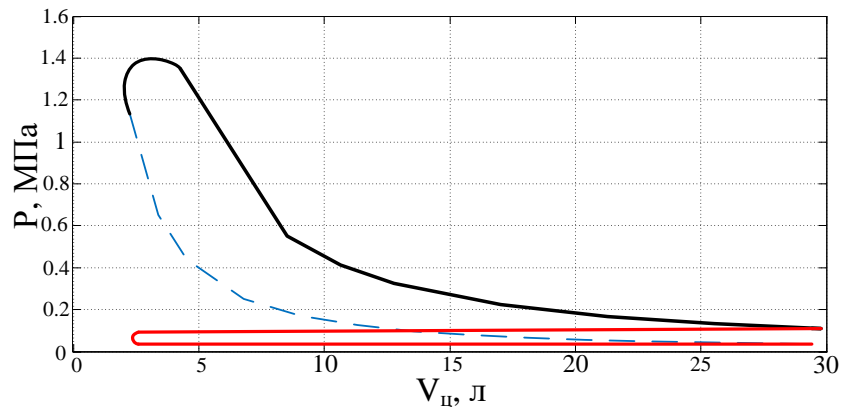


Рисунок 2 – Індикаторна діаграма роботи дизеля

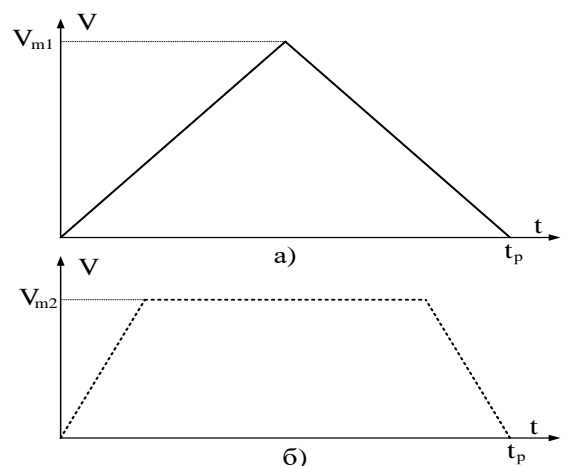


Рисунок 3 – Різновиди тахограм розгону поїзда

При тестуванні моделі основними обмеженнями були час руху, який для перегону Харків–Мерефа не повинен перевищувати 45 хв., а також максимальна допустима швидкість, яка для вантажних потягів складає 80 км/год.

З урахуванням цього існує можливість використовувати різні інтенсивності розгону потяга з подальшим утриманням середньої швидкості по перегону. На рисунку 3 представлені два види тахограм руху потяга.

При дослідженні роботи потяга на імітаційній моделі задавались тахограми з максимальними швидкостями в інтервалі 40-80 км/год з кроком 10 км/год. На рисунку 4 наведені результати моделювання для трикутної діаграми (рис. 4,а) та для діаграми з максимальною швидкістю 50 км/год (рис. 4,б). Змінюючи максимальну швидкість трикутної діаграми в діапазоні 70-95 км/год з кроком 5 км/год були отримані результати, які представлені у вигляді тривимірної поверхні (рис.5).

Отримана поверхня підтверджує залежність витрат палива локомотива від режиму ведення потяга машиністом (від часу роботи локомотива на певній позиції та інтенсивності переходу з позиції на позицію) при виконанні однакової роботи, тобто однакового часу руху по перегону. Найменші витрати палива, а саме 29-31 кг мають місце при встановленні максимальної швидкості на рівні 40-50 км/год.

**Третій розділ** присвячений проведенню досліджень, що направлені на вивчення можливості застосування гібридної силової установки на манев-

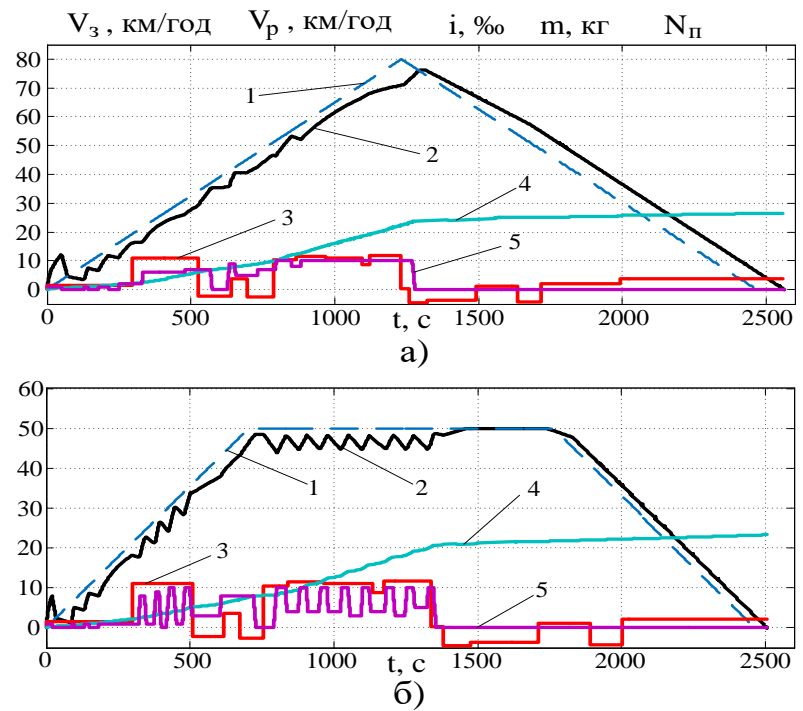


Рисунок 4 – Різновиди тахограм розгону поїзда:  
1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива;  
5 – номер позиції контролера машиніста;

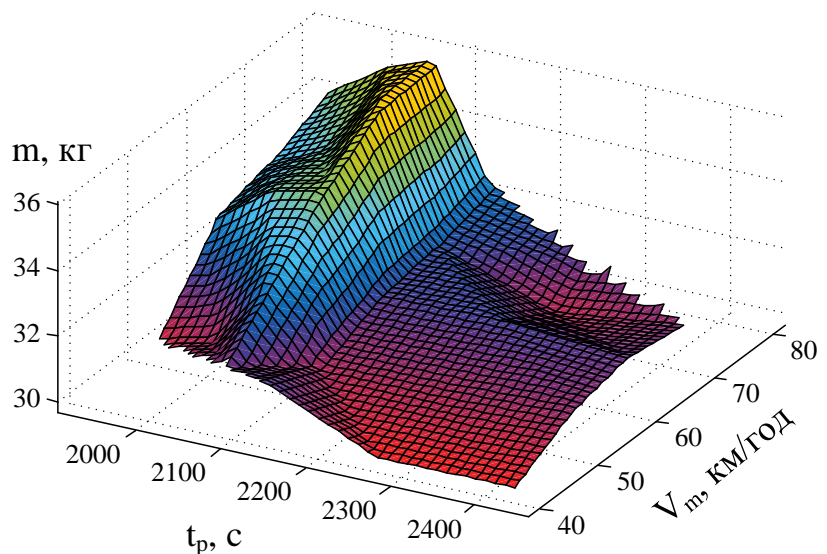


Рисунок 5 – Зміна витрат палива в залежності від максимальної швидкості та часу руху по перегону

ровому тепловозі як із базовими двигунами постійного струму (ДПС), так і з тяговими вентильно-індукторними двигунами (ВІД).

Гібридну систему пропонується виконувати по структурній схемі, що представлена на рис. 6.

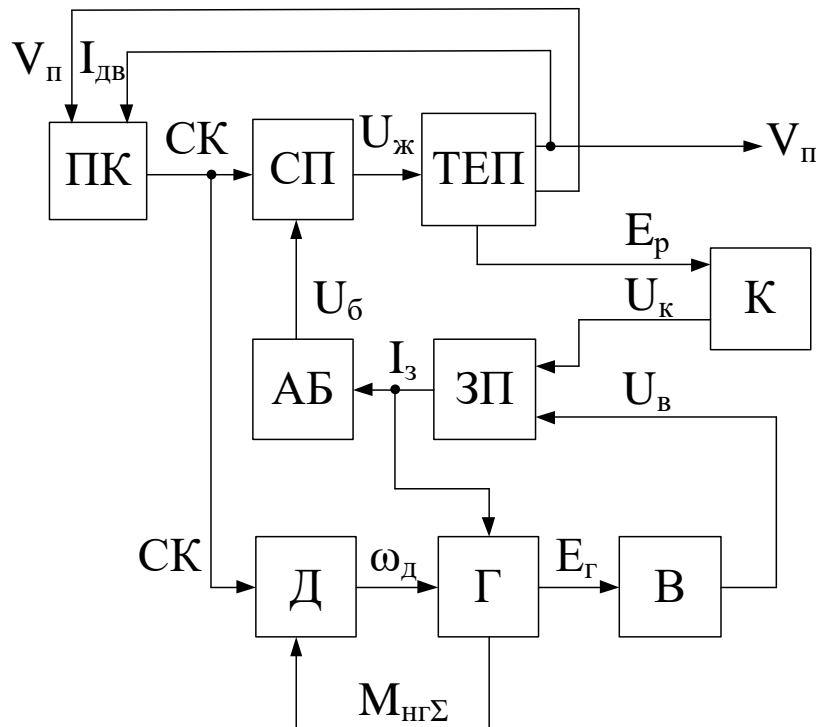


Рисунок 6 – Розгорнута функціональна схема гібридного тепловозу

Запропонована схема складається з пульта керування ПК, статичного перетворювача СП, тягового електроприводу ТЕП, конденсаторної батареї К, зарядного пристрою ЗП, акумуляторної батареї АБ, випрямляча В, синхронного генератора Г та дизеля Д. Вхідними параметрами для блоку ПК є швидкість поїзда  $V_{п}$  та струм двигуна  $I_{дв}$ , від величин яких залежить сигнал керування СК, який є вхідною величиною для Д і СП. В залежності від СК (тобто номера позиції контролера машиніста) СП визначає рівень напруги живлення ТЕП  $U_{ж}$ . СП, в свою чергу, отримує вхідну величину напруги  $U_{б}$  від АБ. ТЕП може працювати як в тяговому режимі, так і в режимі рекуперації. Вихідними величинами блока ТЕП є швидкість поїзда  $V_{п}$ , струм двигуна  $I_{дв}$  (в тяговому режимі) та ЕРС  $E_p$  (в режимі рекуперації). В залежності від величин напруг  $U_{к}$  та  $U_{в}$  ЗП видає величину струму заряду  $I_{з}$ , який поступає в АБ та Г. Вхідними величинами блоку Г є значення швидкості дизеля  $\omega_{диз}$  та струму  $I_{з}$ , а вихідними – ЕРС генератора  $E_{г}$  та моменту навантаження  $M_{нг\Sigma}$ , яке є вхідною величиною для Д.

За аналогією з попереднім розділом було виконане моделювання дизель-генераторної установки, що складається з дизельного двигуна С18 АСЕРТ у поєднанні з синхронним генератором ГС-200-400, та пульта керування.

В якості прототипів накопичувачів енергії на тепловозі пропонується застосовувати акумулятор LT-LYP 770 та іоністор ИКЭ 40/96. Моделювання на-

копичувачів енергії проводилось на основі зарядно-розрядних характеристик, що були апроксимовані поліномами Чебишева.

З розвитком напівпровідникової електроніки все більш широкого застосування знаходять ВІД, які в порівнянні з ДПС мають низку переваг. ВІД представляє собою сукупність електромеханічного перетворювача енергії – індукторної машини і електронного блоку керування. На основі рівнянь Лагранжа для такого електромеханічного перетворювача складена наступна система диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_A}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial i_A}} \left( e_A - r_A i_A - \frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right) \\ \frac{di_B}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial i_B}} \left( e_B - r_B i_B - \frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right) \\ \frac{di_C}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial i_C}} \left( e_C - r_C i_C - \frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right) \\ \frac{di_D}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial i_D}} \left( e_D - r_D i_D - \frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right), \\ M_{\text{об}} = f(i_A, i_B, i_C, i_D, \theta) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{\text{об}} - M_c}{J} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{array} \right. \quad (2)$$

де  $i_A, i_B, i_C, i_D$  – струми відповідних фаз статора;  $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_D$  – потокозчеплення відповідних фаз;  $e_A, e_B, e_C, e_D$  – напруга джерел живлення;  $\theta$  – кут повороту ротора;  $\omega$  – кутова швидкість;  $M_{\text{об}}$  – рушійний момент;  $M_c$  – момент опору;  $J$  – момент інерції ротора.

Система рівнянь (2) представляє собою математичну модель ВІД. Для ідентифікації її параметрів необхідно встановити залежності між потокозчепленням фаз ( $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_D$ ), а також їх похідними  $(\frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial i}, \frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial \theta})$ , з одного боку і узагальненими координатами - з іншого. З метою визначення цих залежностей проводився комплекс цифрових експериментів. Для визначення значення потокозчеплення пропонується здійснювати розрахунок магнітного поля з використанням методу кінцевих елементів для плоскопаралельного завдання. Для вирішення поставленої задачі використовувався програмний комплекс FEMM, що дозволяє розрахувати стаціонарні плоскопаралельні магнітні поля.

Розподіл магнітних ліній в розрахунковій схемі ВІД при узгодженому і розузгодженому положеннях при включеній фазі А представлені на рисунку 7.

Результатом розрахунку є залежності потокозчеплення фази та електромагнітного моменту від магніторушійної сили (МРС) та кута повороту ротора. Для отримання безперервних залежностей потокозчеплення та електромагнітного моменту результати цифрового моделювання були апроксимовані безперервними функціями виду:

$$f(i_A, \theta) = \sum_{l=1}^m \left[ \left( \sum_{h=0}^n aa_h \cdot i_A^h \right) \times \right. \\ \left. \times \cos(l\theta) + \left( \sum_{h=0}^n bb_h \cdot i_A^h \right) \sin(l\theta) \right] + (3) \\ + \sum_{h=0}^n cc_h \cdot i_A^h$$

де  $aa_h, bb_h, cc_h$  – коефіцієнти полінома;  $i_A$  – струм фази А;  $\theta$  – кут повороту ротора;  $l$  – номер гармоніки.

Для визначення коефіцієнтів був використаний метод на основі поліномів Чебишева.

Невід’ємною складовою вентиляно-індукторного приводу є електронний комутатор. При його моделюванні були використані технічні характеристики IGBT-транзистора MIO1800-17E10 та діода Д143-1000-18-УХЛ2.

Для отримання осцилограм роботи гібридного тепловозу була розроблена імітаційна модель його роботи з використанням реального профілю шляху ділянки Харків–Мерефа та основних рівнянь руху потягу. Така модель дозволила використовувати в якості тягового як ДПС, так і ВІД. Були отримані осцилограми роботи тепловоза при різних тахограмах руху поїзда. Для обмеження швидкості 50 км/год такі осцилограми представлені на рисунку 8.

Отримано поверхні, які відображають залежності витрат палива, напруги акумуляторної батареї від максимальної швидкості тахограми та часу руху перегонном для двох типів приводів (рис. 9). Ці залежності дають змогу стверджувати, що тепловоз із гібридною силовою установкою є більш енергоефективним, ніж традиційний. Зменшення витрат палива тепловозом знаходиться у межах 5,62-11,2 кг у порівнянні з традиційною системою, що складає від 18,7% до 31,3%.

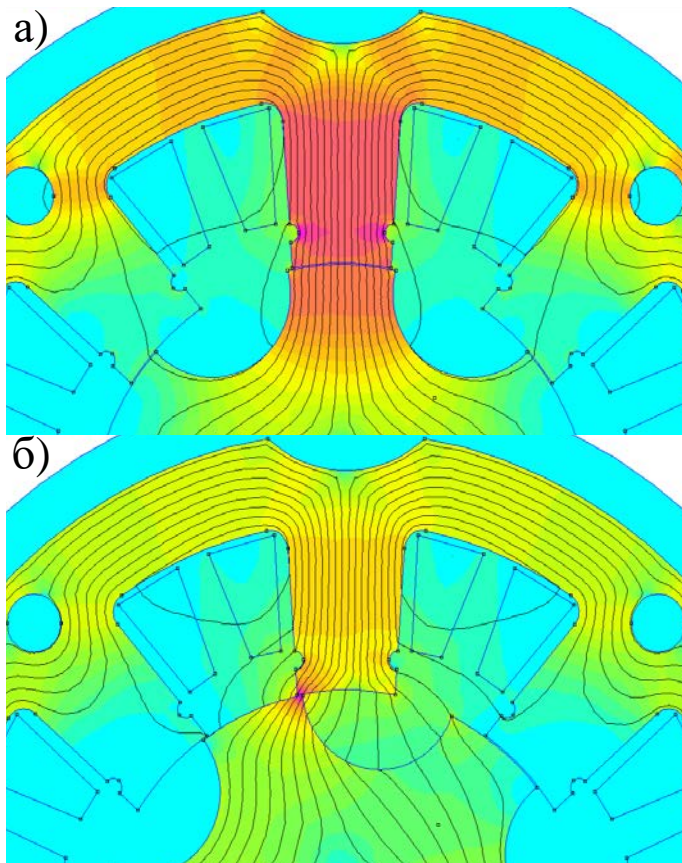


Рисунок 7 – Розподіл магнітного поля у зубцях ВІД: а) при узгодженому положенні; б) при розузгодженому положенні

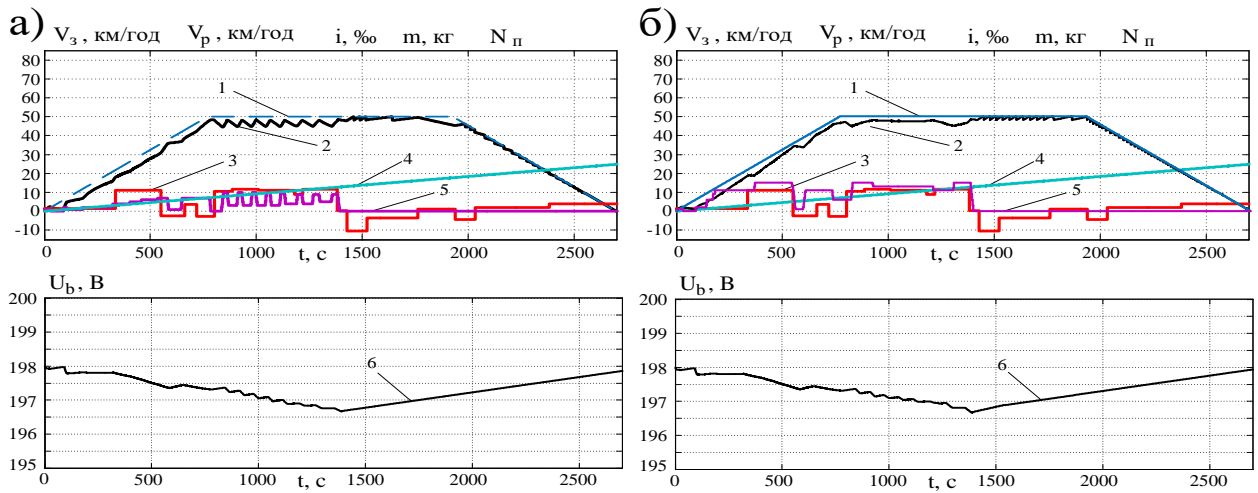


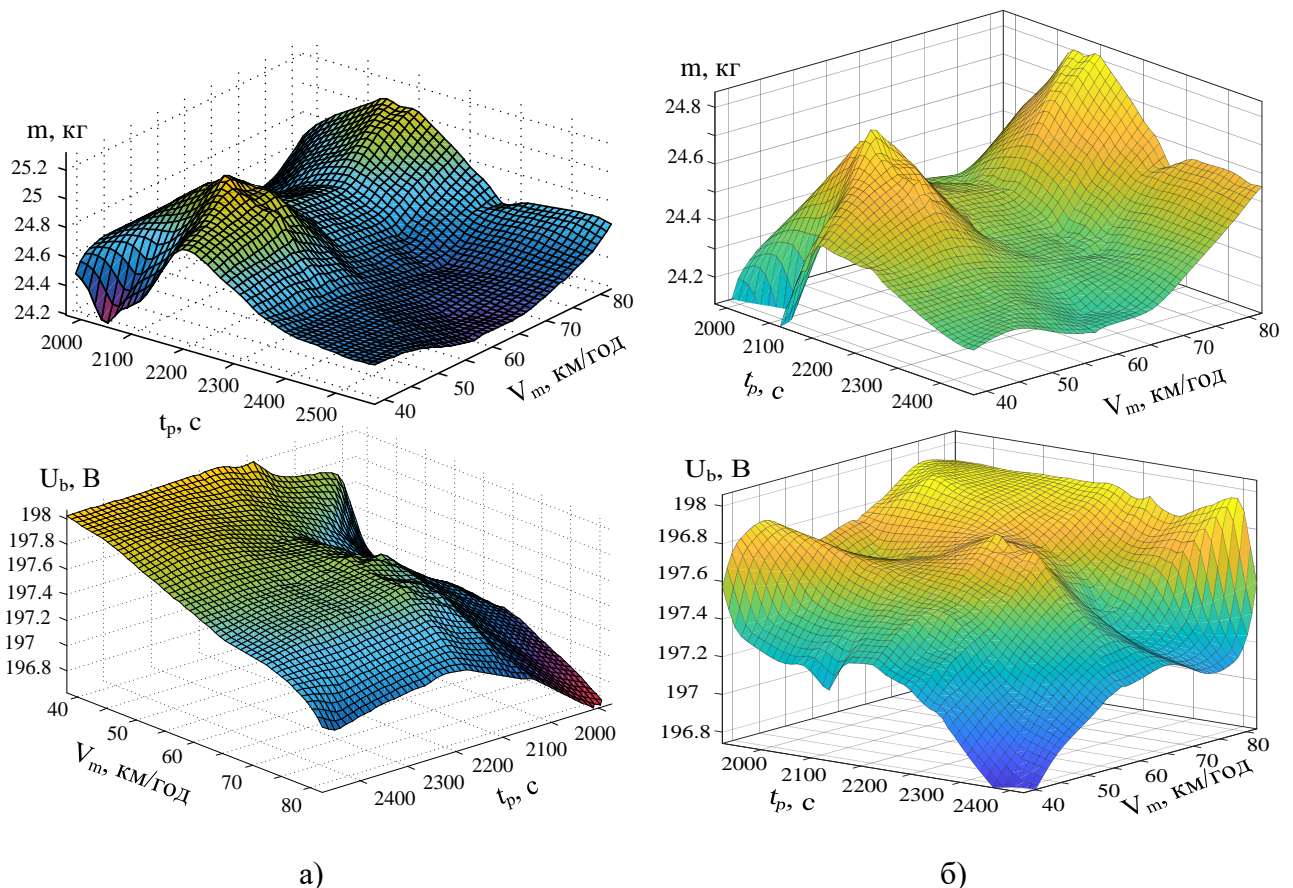
Рисунок 8 – Осцилограми роботи гібридного локомотива:

а) з ДПС; б) з ВІД

1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху;

4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста;

6 – напруга акумуляторної батареї



а)

б)

Рисунок 9 – Зміна витрат палива  $m$  та напруги акумуляторної батареї  $U_b$

в залежності від максимально швидкості та часу по перегону:

а) гібридний тепловоз з ДПС; б) гібридний тепловоз з ВІД

З використанням ВІД спостерігається тенденція більш інтенсивного зменшення витрат палива з ростом максимальних швидкостей трикутної тахограми

(руху ділянкою) у діапазоні 80-95 км/год. Зменшення витрат палива в даному діапазоні складає 0,5-1,5%. В діапазоні швидкостей 55-75 км/год спостерігається зниження розходу палива тепловозом через перехід конденсатора в режим заряду акумуляторної батареї.

На основі проведеного аналізу встановлено залежність витрат палива тепловозом від режиму ведення поїзда, тому існує необхідність в розробці системи автоматичного керування з використанням регулятора швидкості, який би більш точно відпрацьовував задану тахограму.

У **четвертому розділі** синтезовано регулятори швидкості та виконано аналіз їх роботи з точки зору основних показників якості регулювання.

Так як ВІД характеризується істотними нелінійностями, то для синтезу регуляторів неприйнятні стандартні методи, що застосовуються для регуляторів лінійних об'єктів управління. Система керування вентиляно-індукторним приводом (ВІП) являє собою систему підлеглого регулювання координат з можливістю використання традиційних та нетрадиційних регуляторів швидкості, таких як модальний та на базі нечіткої логіки.

Розробка модального регулятора проводилась на основі функціональної схеми, що наведена на рисунку 10.

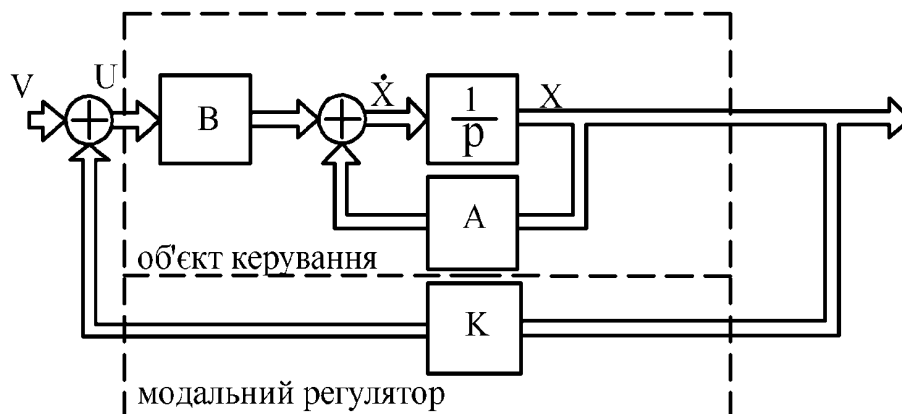


Рисунок 10 – Структурна схема замкненої багатомірної системи з модальним регулятором

В даному випадку замкнена система керування буде описуватись наступними рівняннями:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ U = V - KX \end{cases}, \quad (4)$$

де  $X$  – вектор-стовпчик станів системи;  $A$  – квадратна матриця власних значень розмірності  $n \times n$ ;  $B$  – прямокутна матриця керування розмірності  $n \times r$ ;  $U$  – матриця керування;  $V$  – матриця завдання;  $K$  – матриця-строчка зворотного зв'язку, що складається з коефіцієнтів зворотного зв'язку за вектором стану  $X$ .

Модальний регулятор є безінерційним регулятором. Він встановлюється в ланцюгу зворотного зв'язку. На його вході здійснюється алгебраїчне складання всіх зворотних зв'язків за вектором стану.

Для визначення коефіцієнтів зворотного зв'язку регулятора було визначено характеристичне рівняння замкненої системи:

$$\begin{aligned}
\det(pI - A + BK) &= p \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & \frac{R_e}{T_M c \Phi_H} & 0 \\ \frac{c \Phi_H}{R_e T_e} & -\frac{1}{T_e} & \frac{1}{R_e T_e} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_\mu} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{TP}}{T_\mu} \end{vmatrix} \cdot |\kappa_0 \quad \kappa_1 \quad \kappa_2| = \\
&= p^3 + \left( \frac{1}{T_e} + \frac{1}{T_\mu} + \frac{K_{TP}}{T_\mu} \kappa_2 \right) \cdot p^2 + \left( \frac{(c \Phi_H)^2}{J R_e T_e} + \frac{1}{T_e T_\mu} + \frac{K_{TP} \kappa_2}{T_\mu} + \frac{K_{TP} \kappa_1}{R_e T_e T_\mu} \right) \cdot p + \\
&+ \left( \frac{(c \Phi_H)^2}{J R_e T_e T_\mu} + \frac{K_{TP} (c \Phi_H)^2 \cdot \kappa_2}{J R_e T_e T_\mu} + \frac{K_{TP} c \Phi_H \cdot \kappa_0}{J R_e T_e T_\mu} \right), \\
c \Phi_H &= \frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial \theta},
\end{aligned} \tag{5}$$

де  $I$  – одинична матриця;  $R_e$  – опір фазної обмотки;  $T_M$  – електромеханічна стала часу;  $T_e$  – електромагнітна стала часу;  $T_\mu$  – мала стала часу перетворювача;  $K_{TP}$  – коефіцієнт перетворювача;  $\kappa_0$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю;  $\kappa_1$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом;  $\kappa_2$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою тиристорного перетворювача.

Коефіцієнти в каналах зворотних зв'язків  $\kappa_0$ ,  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$  для вентильно-індукторного приводу представляють собою тривимірні поверхні, які представлені на рисунку 11.

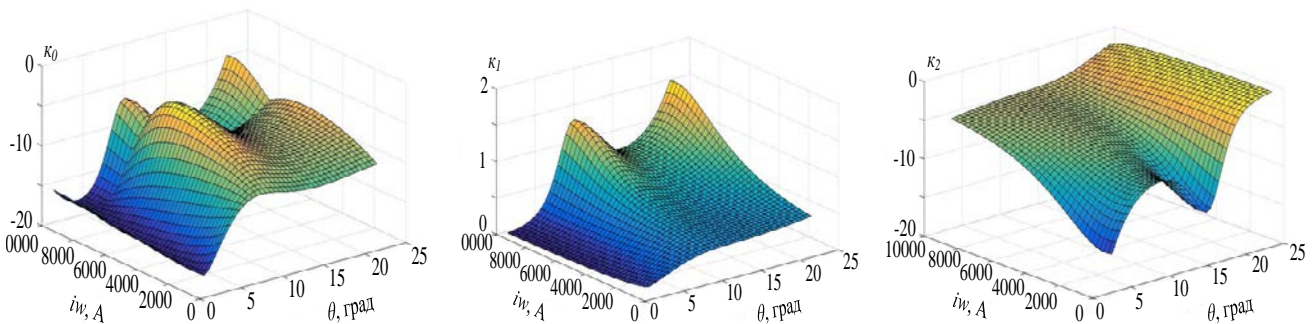


Рисунок 11 – Залежність коефіцієнтів  $\kappa_0$ ,  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$  від кута повороту ротора та МРС

Синтез нечіткого регулятора виконувався на базі ПІД-регулятора. Сигнал на виході ПІД-регулятора може бути представлений як

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \tag{6}$$

де  $K_p$  – коефіцієнт передачі пропорційної складової;  $K_i$  – коефіцієнт передачі інтегральної складової;  $K_d$  – коефіцієнт передачі диференціальної складової.

На підставі цієї передавальної функції можна отримати різницеве рівняння, що описує алгоритм роботи дискретного ПІД-регулятора

$$\begin{aligned}
u[n] &= K_p e[n] + K_i (u[n-1] + T_0 e[n]) + \frac{K_d}{T_0} (e[n] - e[n-1]) = \\
&K_p e[n] + K_i T_0 e[n] + \frac{K_d}{T_0} (e[n] - e[n-1]) + K_i u[n-1],
\end{aligned} \tag{7}$$

де  $T_0$  – період квантування;  $n=0, 1, 2$  – номер поточного періоду квантування.

В якості методів знаходження коефіцієнтів ПІД-регулятора було обрано метод – Чина-Хронса-Рєвіка (CHR0%, CHR20%). Даний метод передбачає використання реакції об'єкту управління на ступінчасту дію з використанням відповідних математичних розрахунків. Коефіцієнти нечіткого ПІД-регулятора швидкості для керування вентиляно-індукторним приводом мають вигляд тривимірних поверхонь, що наведені на рисунку 12.

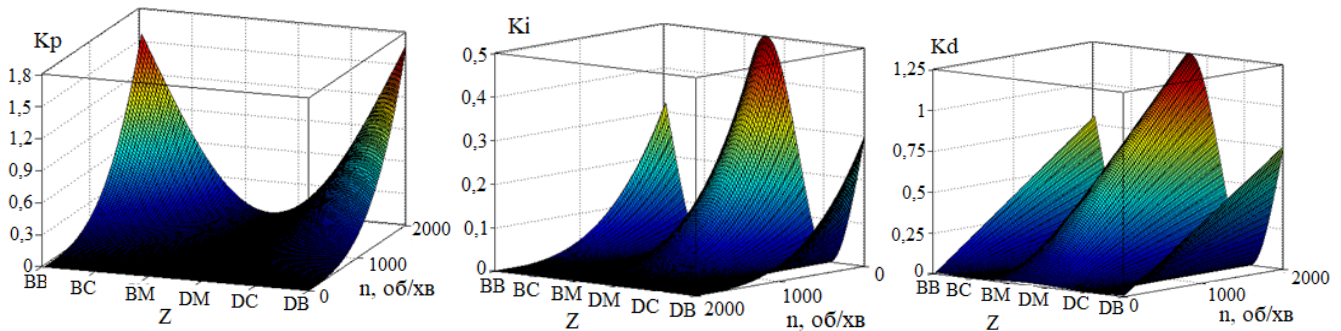


Рисунок 12 – Вигляд коефіцієнтів нечіткого ПІД-регулятора

Для побудови фаззі-регулятора, структурна схема якого наведена на рисунку 13, було використане рівняння (7) та коефіцієнти (рис. 12).

У блоці фаззі-логіки (БФЛ) здійснюється три етапи обробки інформації: фазифікація, інференція, дефазифікація.

Для синтезованих регуляторів швидкості були створені їх імітаційні моделі, на підставі яких отримані осцилограми роботи двигунів при постійному навантаженні.

Проаналізувавши отримані осцилограми були визначені основні показники якості роботи синтезованих регуляторів, які були зведені в таблицю 1.

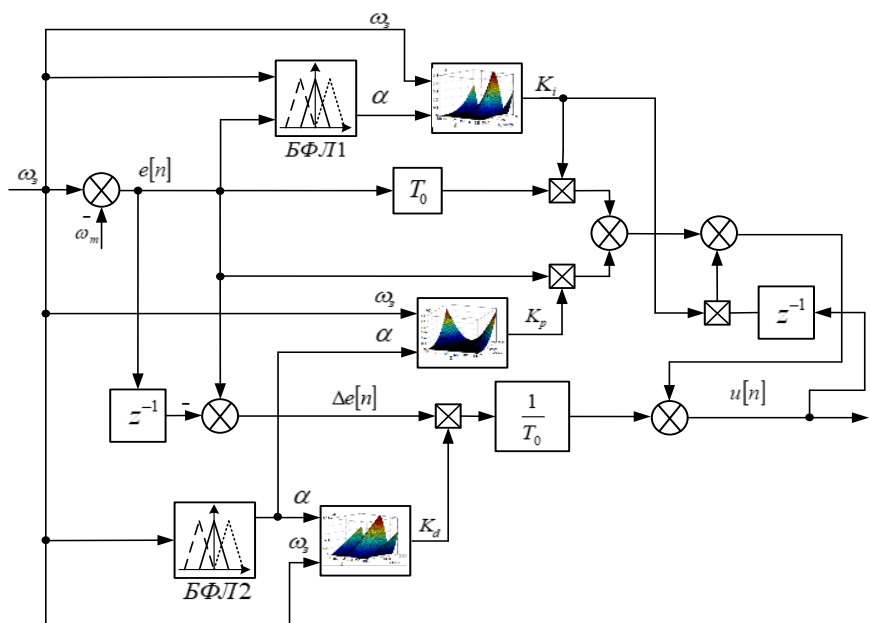


Рисунок 13 – Структурна схема нечіткого ПІД-регулятора

Таблиця 1 – Основні показники якості процесів регулювання

Показники якості	Модальний регулятор	Нечіткий регулятор
Максимум перерегулювання, $\sigma_{\max}$ , %	7,8	2,3
Час регулювання, $t_p$ , с	3,21	2,14
Кількість коливань, $N_p$	1	0

З розрахованих показників видно, що найбільш якісний перехідний процес відповідає нечіткому регулятору швидкості, тому для подальшого дослідження роботи гібридного тепловозу з ВІП буде застосовано саме такий тип регулятора.

Для дослідження роботи гібридного тепловозу з ВІП було створено його узагальнену модель з використанням всіх раніше розглянутих підструктур гібридного тепловозу та нечітким регулятором. Така модель дозволила отримати діаграми, що представлені на рисунку 14.

Отримані результати моделювання роботи гібридного маневрового тепловозу з ВІП та нечітким ПІД-регулятором дають змогу стверджувати про доцільність застосування такого типу привода на гібридних тепловозах. Завдяки більш точному підтриманню швидкості руху поїзда ділянкою витрати палива зменшились у порівнянні з ВІП, що керується від контролера машиніста, на 2,1 кг, що складає 8,56%. Також у процесі роботи локомотива знизилась глибина розряду акумуляторної батареї, що обумовлюється підтриманням регулятором струму двигуна на рівні, що відповідає потребам роботи у кожен момент часу. Застосування регуляторів не тільки дає економічну вигоду, а й виключає людський фактор при роботі локомотива, що підвищує безпеку руху.

**П'ятий розділ** присвячено експериментальним дослідженням на діючому обладнанні, які спрямовано на синтез системи керування ВІП, перевірку ефективності системи керування з модальним та на базі нечіткої логіки регуляторами, а також на вивчення специфіки роботи ВІД в системі колесо – тяговий двигун.

В якості об'єкта керування був обраний чотирьохфазний вентилюно-індукторний двигун, розроблений одеським колективом під керів-

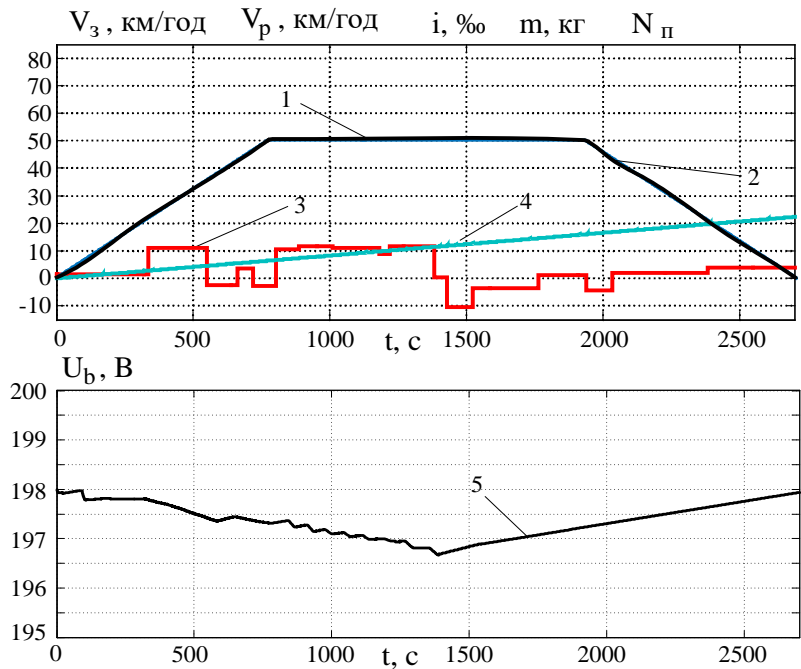


Рисунок 14 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ВІП при максимальній швидкості 50 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – напруга акумуляторної батареї



Рисунок 15 – Загальний вигляд системи колесо – тяговий двигун

ництвом доктора технічних наук, професора Римші Віталія Вікторовича. Загальний вигляд електродвигуна спільно з редуктором і колісною парою представлено на рисунку 15.

Запропонована функціональна схема системи управління для даного ВІД приведена на рисунку 16. Вона складається з пульта управління, мікроконтролера, драйверів верхніх і нижніх ключів, електронного комутатора і датчиків струму. Для управління ВІД використаний мікроконтролер dsPIC30F3011 фірми Microchip, спеціально призначений для вирішення подібного роду завдань і цифрової обробки сигналу.

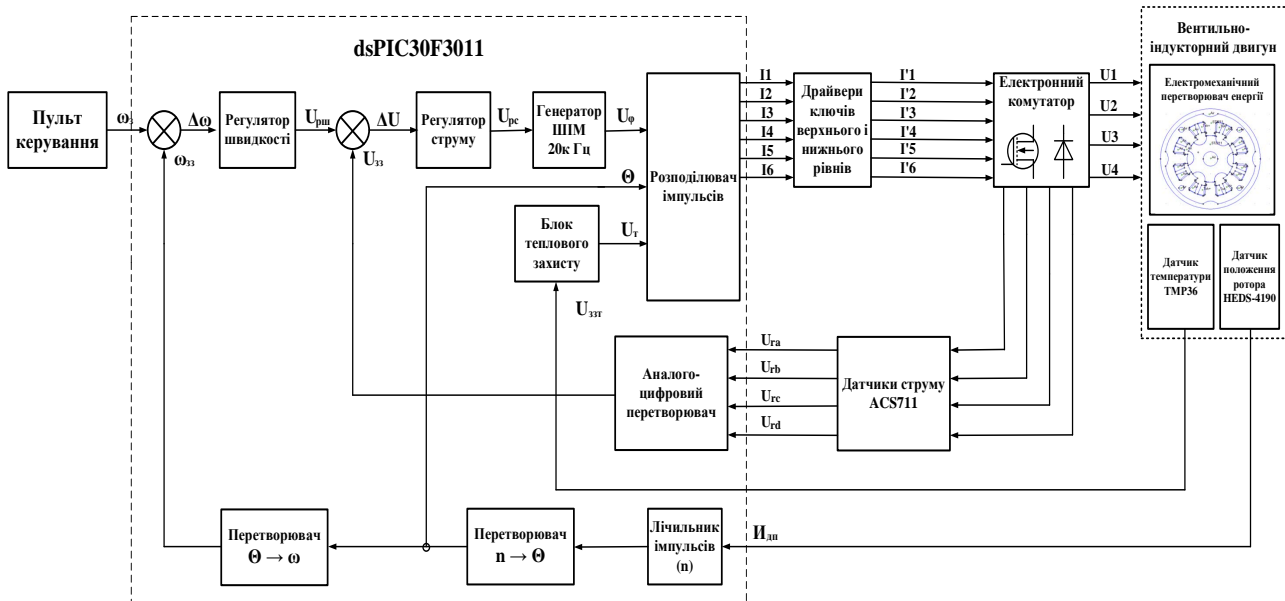


Рисунок 16 – Функціональна схема системи управління ВІД



Рисунок 17 – Зовнішній вид макетного зразка ВІП

Зовнішній вигляд макетного зразка ВПІ показаний на рисунку 17. В даному випадку колісна пара закріплена на стійках на підставці через два опорних підшипника. На валу двигуна закріплена шестерня, а на колісній парі розміщено зубчасте колесо з кількістю зубів 16 і 51 відповідно. Передавальне число редуктора дорівнює 3,2. Двигун жорстко закріплений до підставки. Силові дроти і дроти управління між собою розділені і екрановані для захисту від наведень і перешкод. Як навантаження був використаний важіль механічного гальма. Напруга джерела живлення  $U_d = 100\text{В}$  при проведенні випробувань підтримувалося на постійному рівні з частотою широтно-імпульсної модуляції 20кГц і з обмеженням струму на рівні 3А. Для зручності роботи з макетом передбачено підключення рідкокристалічного дисплея, з можливістю виведення різної інформації, що особливо важливо на етапі налагодження.

Випробування ВПІ проводилися з використанням раніше розглянутої системи управління. Метою експериментів був аналіз роботи приводу при різних швидкостях обертання машини, стабілізації швидкості, забезпечення плавності розгону двигуна (відповідно і колісної пари), зняття осцилограм основних координат перехідного процесу. За допомогою комп'ютера вироблялося повне управління приводом: вибір типу регулятора швидкості, діапазон, плавність і напрямок її регулювання, вибір алгоритму плавності пуску і забезпечення необхідного пускового зусилля.

Графіки фазного струму і напруги були зняті на цифровому осцилографі типу RIGOL DS5022M. На рисунку 18 представлені характеристики перехідного процесу швидкості з двома типами регуляторів.

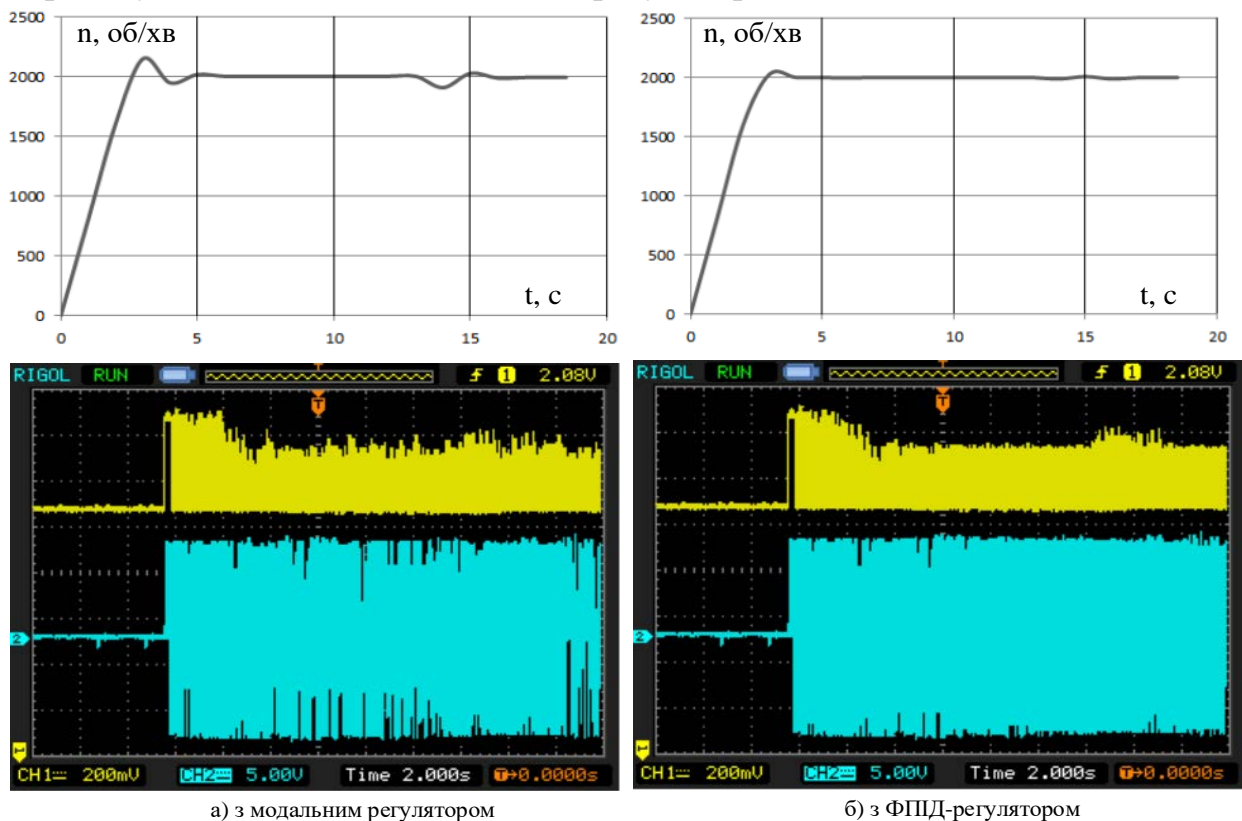


Рисунок 18 – Осцилограма роботи ВПІ з різними типами регуляторів

Після набору двигуном заданої швидкості в 2000 об/хв, в момент часу 13 с, східчасто прикладалася додаткове навантаження, чому відповідає просадка швидкості. Як показують отримані осцилограми, найбільш якісний перехідний процес спостерігається при використанні регулятора на базі нечіткої логіки. Перехідний процес за швидкістю з модальним регулятором має незначне перегулювання, його величина – 7%, яке практично повністю відсутнє (1-1,5%) із застосуванням регулятора, побудованого на базі нечіткої логіки.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи вирішена науково-практична задача зменшення витрат пального та покращення динамічних показників роботи гібридного тепловозу з вентиляно-індукторним приводом з використанням системи керування з різними типами регуляторів швидкості для отримання заданого закону керування рухом поїзда. Перевагою запропонованої системи є застосування мікропроцесорної техніки, що дозволяє відпрацьовувати заданий режим ведення поїзда, застосовувати вентиляно-індукторний привод, а також реалізовувати нелінійні регулятори швидкості, захистити від пошкодження елементи електродвигуна та кінематичної ланки, а також здійснювати контроль процесу зарядки акумуляторної та конденсаторної батареї локомотива.

1. Проведено теоретичне узагальнення наукових робіт і практичних розробок у частині спрямування розвитку й сучасного технічного рівня існуючих систем керування тепловозів. Результати вказали на недоліки існуючих систем керування з точки зору сучасних можливостей мікропроцесорної техніки та накопичувачів енергії.

2. Розроблено та створено в середовищі «MATLAB Simulink» імітаційні моделі окремих елементів тепловоза: пульта керування, що імітує роботу машиніста; регулятора кількості обертів дизеля з додатковим блоком, що визначає витрати палива в залежності від навантаження, яке прикладене до дизеля K6S310DR; генератора постійного струму зі збуджувачем; тягового електричного приводу з урахуванням сил, що діють на потяг; дизельного двигуна, що враховує особливості поведінки індикаторної діаграми.

3. Розроблена імітаційна модель роботи традиційного тепловоза з використанням реального профілю шляху ділянки Харків–Мерефа, отримані осцилограми роботи тепловоза при різних тахограмах руху поїзда, побудовані тривимірні поверхні залежності витрати пального від максимальної швидкості та часу руху по перегону.

4. Запропонована функціональна схема гібридного тепловозу, яка включає в себе дизель, синхронний генератор, акумулятор, конденсатор, тяговий двигун, в якості якого може застосовуватись двигун постійного струму послідовного збудження або вентиляно-індукторний. Розроблено функціональні схеми накопичувачів енергії.

5. Розроблено імітаційну модель роботи гібридного тепловоза з використанням реального профілю шляху ділянки Харків–Мерефа, отримані осцилог-

рами роботи тепловоза при різних тахограмах руху поїзда, побудовані тривимірні поверхні залежності витрати пального від максимальної швидкості та часу по перегону. Економія складає у межах 5,62-11,2 кг маси пального у порівнянні з традиційною системою.

6. Синтезовані модальний та нечіткий регулятори швидкості вентиляно-індукторного приводу, а також розроблені структурні схеми вентиляно-індукторного приводу з модальним та нечітким регуляторами, на основі яких складені імітаційні моделі їх роботи.

7. Розроблено узагальнену модель роботи гібридного тепловозу з вентиляно-індукторним приводом та нечітким регулятором та отримані осцилограми руху тепловоза з поїздом ділянкою шляху, побудовані тривимірні поверхні залежності витрати пального від максимальної швидкості та часу по перегону. Економія складає у межах 7,91-13,5 кг маси пального у порівнянні з традиційною системою.

8. Для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі вентиляно-індукторного приводу з модальним регулятором та регулятором на базі нечіткої логіки та підтвердження працездатності системи автоматичного керування розроблено стенд, на якому отримано осцилограми електричних та механічних характеристик роботи об'єкта керування.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації**

1. Денис И. В. Концептуальный проект маневрового тепловоза нового поколения / С. Г. Буряковський // Международный профессиональный журнал «Локомотивинформ» № 11-12 (113-114) 2015 С. 7-11

2. Денис І. В. Обґрунтування необхідності модернізації тепловозу ЧМЕЗ із використанням гібридної силової установки / С. Г. Буряковський, А. С. Маслій, Д. П. Помазан, І. В. Денис // Електрифікація транспорту. – Дніпро : ДНУЗТ, 2016. – №12. – С. 82-85.

3. Denys I. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of a hybrid diesel locomotive / S. Buriakovskiy, M. Babaiev, V Liubarskyi, N. Karpenko, Ar.Maslii, D. Pomazan, An. Maslii, I. Denys // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2018. – №1/2 (91). – С. 68-75.

4. Денис І. В. Дослідження режимів роботи тепловоза ЧМЕЗ на імітаційній моделі / С. Г. Буряковський, А. С. Маслій, В. В. Панченко, Д. П. Помазан, І. В. Денис // Електротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – №2018/2. – С. 59-63.

5. Denys I. Research and development of an electric traction drive based on a switched reluctance motor / S. Buriakovskiy, A. Maslii, O. Pasko, I. Denys // Transport Problems. – 2018. – №13/2. – С. 69-80.

### **Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

6. Денис І. В. Система управління маневровим тепловозом з гібридним приводом / С. Г. Буряковський, І. В. Денис // Проблеми перетворення електроенергії на електричному транспорті. – Харків: Семінар НАН України, 2013-2015.

7. Денис І. В. Дослідження режимів роботи тепловоза ЧМЕЗ за допомогою імітаційної моделі / С. Г. Буряковський, А. С. Маслій, Д.П. Помазан, І. В. Денис // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018. – Харків: НТУ «ХП», 2018. – С. 182.

8. Денис І. В. Порівняльний аналіз роботи традиційного та гібридного тепловозів / С. Г. Буряковський, А. С. Маслій, Д.П. Помазан, Н.В. Григоренко, І. В. Денис // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. – Кременчук : КрНУ, 2018. – №5/2018 – С. 172.

## АНОТАЦІЇ

**Денис І.В. «Покращення динамічних показників роботи гібридного тепловозу з вентиляно-індукторним приводом».** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів – Державний університет інфраструктури та технологій (ДУІТ), Київ, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню актуального науково-практичного завдання, а саме вдосконалення гібридної силової установки та дослідження гібридного тепловоза на базі вентиляно-індукторного двигуна з використанням системи керування з різними типами регуляторів швидкості з метою зменшення витрати пального та отримання заданого закону керування рухом поїзда. Маневрові тепловози виконують роботу з формування та розформування поїздів на станціях, а тому вони є одними з основних виконавців перевізної роботи залізниць. Парк маневрових тепловозів АТ «Укрзалізниця» по багатьом параметрам не відповідає потребам залізничного транспорту і європейським стандартам якості транспортних послуг. Більшість локомотивів, що знаходяться в експлуатації, мають на 40-60% більші витрати на технічне обслуговування й ремонти в порівнянні з сучасними моделями.

З метою відповідності сучасним вимогам до маневрових тепловозів світовими компаніями у галузі локомотивобудування прослідковується тенденція впровадження гібридних силових установок на залізничному транспорті. Проте, усі маневрові тепловози, що експлуатуються в Україні, мають силову установку без накопичувачів енергії. Разом з цим використання потужних маневрових тепловозів не оправдане економічно, тому що їх застосування при частковому завантаженні веде до перевитрат палива.

У дисертаційній роботі розроблено імітаційну модель реального маневрового тепловозу та досліджено особливості його роботи при різних режимах ведення поїзда; запропоновано функціональну схему гібридного маневрового тепловозу з використанням двох типів приводів; ідентифіковано параметри математичних моделей вентиляно-індукторних перетворювачів енергії; розроблено імітаційну модель накопичувачів енергії, дизель-генераторної установки, силових перетворювачів; синтезовано модальний та на базі нечіткої логіки регулятори швидкості; створено макетний зразок системи колесо – тяговий двигун з

вентильно-індукторним приводом та системою керування на базі нечіткої логіки, проведено фізичні експерименти, виконано аналіз отриманих результатів досліджень.

*Ключові слова:* маневровий тепловоз, накопичувач енергії, двигун постійного струму, вентильно-індукторний двигун, дизель-генераторна установка, статичний перетворювач, тяговий електричний привід, акумуляторна батарея, конденсаторна батарея.

**Денис И.В. «Улучшение динамических показателей работы гибридного тепловоза с вентильно-индукторным приводом». – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог и тяга поездов - Государственный университет инфраструктуры и технологий (ДУИТ), Киев, 2019.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической задачи совершенствования гибридной системы и исследования гибридного тепловоза на базе вентильно-индукторного двигателя с использованием системы управления с различными типами регуляторов скорости для получения заданного закона управления движением поезда и уменьшения расхода топлива.

Маневровые тепловозы выполняют работу по формированию и расформированию поездов на станциях, а поэтому они являются одними из основных исполнителей перевозочной работы железных дорог. Парк маневровых тепловозов АО «Укрзалізниця» по многим параметрам не отвечает потребностям железнодорожного транспорта и европейским стандартам качества транспортных услуг. Большинство локомотивов, находящихся в эксплуатации, имеют на 40-60% большие затраты на техническое обслуживание и ремонты по сравнению с современными моделями.

С целью соответствия современным требованиям к маневровым тепловозам мировыми компаниями в области локомотивостроения прослеживается тенденция внедрения гибридных передач мощности на железнодорожном транспорте. Однако, все маневровые тепловозы, эксплуатируемые в Украине, оснащены передачей без накопителей энергии. Вместе с этим использование мощных маневровых тепловозов не оправдано экономически, так как их применение при частичной загрузке ведет к перерасходу топлива.

В диссертационной работе разработана имитационная модель существующего маневрового тепловоза и исследованы особенности его работы при различных режимах ведения поезда; предложена функциональная схема гибридного маневрового тепловоза с использованием двух типов приводов; идентифицированы параметры математических моделей вентильно-индукторных преобразователей энергии; разработана имитационная модель накопителей энергии, дизель-генераторной установки, силовых преобразователей; синтезированы модельный и фаззи-регуляторы скорости; создан макетный образец системы колесо - тяговый двигатель с вентильно-индукторным приводом и системой управления на базе нечеткой логики, проведены физические эксперименты, выполнен анализ полученных результатов исследований.

*Ключевые слова:* маневровый тепловоз, накопитель энергии, двигатель постоянного тока, вентильно-индукторный двигатель, дизель-генераторная установка, статический преобразователь, тяговый электрический привод, аккумуляторная батарея, конденсаторная батарея.

**Denys I.V. "Improvement of dynamic performance of hybrid diesel locomotive with valve-induction drive".** – Manuscript.

Dissertation for scientific degree of candidate of engineering science on speciality 05.22.07 - Railway rolling stock and train traction - State University of Infrastructure and Technology (DUIT), Kyiv, 2019.

The is devoted to solving the actual scientific and practical task of improving the hybrid system and researching a hybrid locomotive on the basis of a valve-induction motor using a control system with different types of speed regulators for obtaining a specified law governing the train movement and reducing fuel consumption.

Maneuver locomotives perform work on the formation and unblocking of trains at stations, and therefore they are one of the main performers of railway transport. Maneuvering locomotive fleet of Ukrzaliznytsya JSC does not meet the needs of the railway transport and the European standards of quality of transport services in many ways. Most locomotives in operation have 40-60% higher maintenance and repair costs compared to modern models.

In order to meet the current requirements for shunting locomotives, world-class companies in the field of locomotive engineering are following the tendency to introduce hybrid power transmissions on rail transport. However, all powered drives operating in Ukraine have a transmission without energy storage. However, the use of powerful shunting diesel locomotives is not justified economically, because their use in partial loading leads to over-consumption of fuel.

In the dissertation work the simulation model of the existing shunting diesel locomotive is developed and the features of its work under different modes of driving of a train are investigated; the functional scheme of the hybrid shunting diesel locomotive with the use of two types of drives is proposed; the parameters of the mathematical models of the gate-induction energy converters are identified; The simulation model of energy storage devices, diesel generator sets, power converters was developed; Modal and speed regulators are synthesized; A prototype system of the wheel was created - a traction motor with a valve-induction drive and a control system based on fuzzy logic, physical experiments were carried out, an analysis of the results of the research was carried out.

*Keywords:* shunting diesel locomotive, energy storage, DC motor, power switched reluctance motor, diesel generator set, static converter, traction electric drive, battery, condenser battery.

**ДЕНИС Ігор Володимирович**

**Покращення динамічних показників роботи гібридного тепловозу  
з вентиляно-індукторним приводом**

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук за спеціальністю  
05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Підписано до друку 31.10.2019. Формат 60×84/16.  
Ум. друк. арк. 1,19. Авт. арк. 0,9.  
Наклад 100 пр.

Друкарня С. Г. Щербенка «Літерія»  
вул. Рокоссовського, 5/3, м. Кривий Ріг, 50027  
097-192-20-77

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4561 від 13.06.2013 р.