

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Денис Ігор Володимирович

УДК 629.424.1.001.76

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

05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

І. В. Денис

Науковий керівник
**Буряковський Сергій
Геннадійович,**
доктор технічних наук, професор

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Денис І.В. «Покращення динамічних показників роботи гібридного тепловозу з вентиляно-індукторним приводом». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – «Рухомий склад залізниць та тяга поїздів.» – Державний університет інфраструктури та технологій МОН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі вдосконалення гібридної системи та дослідження гібридного тепловоза на базі вентиляно-індукторного двигуна з використанням системи керування з різними типами регуляторів швидкості для отримання заданого закону керування рухом поїзда та зменшення витрат палива.

В першому розділі **«Аналіз задач і шляхів модернізації маневрових тепловозів»** зроблено наступне:

- ✓ проведено огляд сучасних тепловозів, який показує, що поряд з удосконаленням існуючих типів приводів шляхом заміни ненадійних елементів світовими компаніями проводиться робота над створенням нових рішень з метою підвищення надійності та швидкодії системи керування і отримання високих швидкостей руху поїздів по перегону;
- ✓ розглянуто існуючі гібридні системи, що експлуатуються на залізницях світу, та визначено основні напрямки з питань їх вдосконалення;
- ✓ сформульовані основні задачі та шляхи модернізації маневрових тепловозів залізниць України.

В другому розділі **«Математичне моделювання роботи тепловозу»** зроблено наступне:

- ✓ 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; генератора постійного струму зі збуджувачем;

тягового електричного приводу з урахуванням сил, що діють на потяг, профілю шляху;

- ✓ розрахована індикаторна діаграма дизеля K6S310DR з подальшою апроксимацією результатів методом інтерполяції та отримані неперервні залежності тиску та сили, що діють на поршень, в залежності від його переміщення, а в подальшому від кута повороту колінчастого валу в чотирьох режимах.
- ✓ розроблена імітаційна модель роботи тепловоза з використанням реального профілю шляху ділянки Харків–Мерефа, основних рівнянь руху потягу та отримані осцилограми роботи тепловоза при різних тахограмах руху поїзда.

В третьому розділі «**Моделювання гібридного тепловозу з різними типами приводів**» зроблено наступне:

- ✓ 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 вентильно-індукторний;
- ✓ розроблено функціональні схеми накопичувачів енергії, в основу роботи яких покладені зарядно-розрядні характеристики, що були апроксимовані методом поліномів Чебишева;
- ✓ проведено ідентифікацію параметрів вентильно-індукторного двигуна ДВІ-165 та отримано його математичну модель на основі рівнянь Лагранжа II роду;
- ✓ розроблено імітаційну модель роботи гібридного тепловоза з використанням реального профілю шляху ділянки Харків–Мерефа та основних рівнянь руху потягу.

В четвертому розділі «**Синтез регуляторів швидкості**» зроблено наступне:

- ✓ синтезовано модальний регулятор швидкості вентильно-індукторного приводу, розраховано коефіцієнти регулятора, що не є постійними

величинами, а залежать від кута повороту ротора та МРС, побудовані тривимірні поверхні, які графічно відображають залежності коефіцієнтів;

- ✓ розроблена структурна схема вентильно-індукторного приводу з модальним регулятором, на основі якої складена імітаційна модель його роботи;
- ✓ на основі методу Чина-Хронса-Ресвіка отримано діаграми розподілу коефіцієнтів нечіткого ПД-регулятора в залежності від швидкості обертання ротора та його положення;
- ✓ розроблена структурна схема та імітаційна модель роботи вентильно-індукторного приводу з нечітким регулятором;
- ✓ розроблено узагальнену модель роботи гібридного тепловозу з вентильно-індукторним приводом та нечітким регулятором та отримані осцилограми руху тепловоза з поїздом ділянкою.

В п'ятому розділі **«Експериментальні дослідження роботи вентильно-індукторного приводу на макетному зразку»** зроблено наступне:

- ✓ розроблено та виготовлено фізичну модель системи колісна пара – вентильно-індукторний двигун в масштабі;
- ✓ запропоновано систему автоматичного керування вентильно-індукторним приводом на базі мікроконтролера dsPIC30F3011;
- ✓ для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі вентильно-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;
- ✓ отримані результати показують високий рівень співпадання розрахункових діаграм з осцилограмами реальних перехідних процесів в системі керування та електромеханічній системі стрілочного переводу.

ABSTRACT

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

Dissertation for candidate of technical sciences degree by specialty 05.22.07 - "Rolling stock of railways and traction of trains." - State University of Infrastructure and Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation 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 prescribed law governing the movement of the train and reducing fuel consumption.

In the first section "**Analysis of tasks and ways of upgrading shunting diesel locomotives**" the following is done:

- ✓ an overview of modern diesel locomotives was carried out, which shows that, along with the improvement of existing types of drives by replacing unreliable elements by global companies, work is being done to create new solutions in order to increase the reliability and speed of the control system and obtain high speed trains on the run;
- ✓ existing hybrid systems operated on the railways of the world are considered, and the main directions of their improvement are defined;
- ✓ the main tasks and ways of modernization of maneuvers of locomotives of railways of Ukraine are formulated.

In the second section "**Mathematical modeling of the locomotive**" the following is done:

- ✓ the simulation models of separate elements of the locomotive are developed and created in the environment of "MATLAB Simulink": a control panel imitating the work of the driver; the regulator of the number of revolutions of a diesel engine with an additional block, which determines the fuel consumption depending on the load applied to the diesel; DC generator with

exciter; traction electric drive taking into account the forces acting on the train, the profile of the path;

- ✓ the indicator diagram of the K6S310DR diesel engine is calculated, with further approximation of the results by interpolation method, and the continuous pressure and force dependencies on the piston are obtained, depending on its displacement, and further on the angle of rotation of the crankshaft in four modes.
- ✓ the simulation model of the locomotive was developed using the real profile of the route of the Kharkiv-Meref area, the main train motion equations and the loggers received from the locomotive at different tachographs of the train.

In the third section "**Simulation of a hybrid diesel locomotive with different types of drives**" the following is done:

- ✓ the proposed functional diagram of the hybrid diesel locomotive, which includes a diesel engine, a synchronous generator, an accumulator, a condenser, a traction motor, which can be used as a DC motor of a series excitation or a switched reluctance motor;
- ✓ functional schemes of energy storage devices have been developed, the basis of which is the charge-discharge characteristics, which were approximated by the method of Chebyshev polynomials;
- ✓ the identification of the parameters of the switched reluctance motor DWI-165 was determined and its mathematical model was obtained on the basis of Lagrange II equations;
- ✓ the simulation model of the hybrid diesel locomotive was developed using the real profile of the route of the Kharkiv-Merefa area and the main train motion equations.

The fourth section "**Synthesis of speed regulators**" made the following:

- ✓ the modal speed controller of the switched reluctance drive is synthesized; the regulator coefficients are calculated which are not constant values, but depend on the rotation angle of the rotor and the MRS; three-dimensional surfaces are constructed, which graphically represent dependencies of the coefficients;

- ✓ the structural scheme of the switched reluctance drive with a modal regulator is developed, on the basis of which a simulation model of its work is compiled;
- ✓ on the basis of the Chin-Chrones-Resvick method, the diagrams of the distribution of the coefficients of the fuzzy PID controller are obtained, depending on the speed of rotation of the rotor and its position;
- ✓ the structural scheme and simulation model of the operation of the switched reluctance drive with the fuzzy controller is developed;
- ✓ a generalized model of the operation of a hybrid diesel locomotive with a switched reluctance drive and a fuzzy controller was developed and the oscillograms of the locomotive with the train section were obtained.

In the fifth section "**Experimental studies of the operation of the valve-induction drive on a model design**" the following is done:

- ✓ the physical model of the wheel system is developed and manufactured - the switched reluctance motor on a scale;
- ✓ the system of automatic control of the switched reluctance drive based on the microcontroller dsPIC30F3011 is proposed;
- ✓ to confirm the adequacy of the developed mathematical model of the valve-induction drive with a modal regulator and a regulator based on fuzzy logic and to confirm the efficiency of the automatic control system, a stand was developed on which the oscillograms of the electrical and mechanical characteristics of the control object were obtained;
- ✓ the obtained results show a high level of coincidence of the calculated diagrams with the oscillograms of real transient processes in the control system and the electromechanical system of switching.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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, B 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 «ХП», 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.
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.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	11
ВВЕДЕННЯ.....	12
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАДАЧ І ШЛЯХІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ МАНЕВРОВИХ ТЕПЛОВОЗІВ.....	17
1.1 Маневрові тепловози України.....	17
1.2 Закордонні маневрові тепловози.....	28
1.3 Обґрунтування шляху модернізації маневрового тепловоза ЧМЕЗ.....	39
Висновки до розділу.....	42
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТЕПЛОВОЗУ ЧМЕЗ.....	44
2.1 Структурна схема імітаційної моделі тепловоза.....	44
2.2 Імітаційна модель пульта керування.....	45
2.3 Імітаційна модель регулятора кількості обертів дизеля.....	47
2.4 Імітаційна модель дизеля K6S310DR.....	49
2.5 Імітаційна модель генератора зі збуджувачем.....	61
2.6 Імітаційна модель тягового приводу тепловозу.....	65
2.7 Результати імітаційного моделювання.....	67
Висновки до розділу.....	74
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ГІБРИДНОГО ТЕПЛОВОЗУ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРИВОДІВ.....	75
3.1 Вибір та обґрунтування функціональної схеми гібридного тепловоза.....	75
3.2 Математичне моделювання системи Г-Д.....	78
3.3 Імітаційне моделювання накопичувачів енергії.....	81
3.4 Результати імітаційного моделювання роботи гібридного тепловоза з двигуном постійного струму.....	86
3.5 Імітаційне моделювання ВІД.....	95

3.6 Результати імітаційного моделювання роботи гібридного тепловоза з двигуном постійного струму.....	105
Висновки до розділу	112
РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ШВИДКОСТІ	116
4.1 Синтез модального регулятора швидкості.....	116
4.2 Синтез нечіткого регулятора швидкості ВІП.....	129
4.3 Узагальнена модель гібридного тепловозу з ВІП.....	139
Висновки до розділу	143
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВІП НА МАКЕТНОМУ ЗРАЗКУ	144
5.1 Опис структури системи управління ВІД.....	144
5.2 Лабораторні дослідження тягового ВІП.....	154
Висновки до розділу	163
ВИСНОВКИ	164
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	166
ДОДАТКИ	176
Додаток А — Схеми, моделі та структури, що не ввійшли до основного змісту дисертації.....	176
Додаток Б — Список публікацій здобувача та відомості про апробацію результатів дисертації.....	182
Додаток В — Акт про використання результатів дисертаційної роботи.....	186

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- МТ** – маневровий тепловоз
- НЕ** – накопичувач енергії
- ДПС** – двигун постійного струму
- ККД** – коефіцієнт корисної дії
- ВІД** – вентильно-індукторний двигун
- ДГУ** – дизель-генераторна установка
- ЗП** – зарядний пристрій
- СП** – статичний перетворювач
- ТЕП** – тяговий електричний привід
- АБ** – акумуляторна батарея
- К** – конденсаторна батарея
- ЕК** – електронний комутатор
- ВІП** – вентильно-індукторний привід

ВВЕДЕННЯ

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 компанії. Основна частка витрат паливно-енергетичних ресурсів в компанії доводиться 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 залізниці.

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 05.11.2001 р), а також відповідно до держбюджетної НДР МОН України «Розробка і дослідження роботи електроприводу стрілочного переводу моношпального типу» (ДР № 117U000643), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

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 вентильно-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 системи.

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 характеризується 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 проведено 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 методичку 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 методичку створення їх імітаційних моделей, що враховують не лінійність 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 «ХП».

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Серед них: запропоновано функціональну схему гібридного маневрового тепловозу з використанням двох типів приводів; ідентифіковано параметри математичних моделей вентильно-індукторних перетворювачів енергії; розроблено імітаційну модель накопичувачів енергії, дизель-генераторної установки, силових перетворювачів; синтезовано модальний та фаззі-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.

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

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЗАДАЧ І ШЛЯХІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ МАНЕВРОВИХ ТЕПЛОВОЗІВ

Виробнича діяльність експлуатаційних і ремонтних підприємств АТ «Укрзалізниця», а також інших виробничих структур підтверджує потребу в екологічних локомотивах малої потужності для виконання легких маневрових і господарських робіт [1].

Аналіз ходу реконструкції засобів тяги на залізницях світу показує, що полігон залізниць, який обслуговується тягою тепловоза, і обсяг перевезень, що виконуються 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 над створенням 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.

1.1 Маневрові тепловози України

Маневрові тепловози (МТ), що широко застосовуються на залізницях України, призначені для виконання пересувань вагонів по станційних коліях, формування й розформування поїздів, виконання господарських робіт на

станціях та перегонах, вивізних робіт. В цілому парк ПАТ «Укрзалізниця» налічує близько 1520 локомотивів цього різновиду [2].

Упор при конструюванні тепловозів цього різновиду робиться на маневреність і тяглову силу. Локомотиви цієї групи здатні пересуватися по лініях з дуже крутим вигином. Занадто вже велику швидкість, на відміну від пасажирських, такі тепловози розвивати не можуть [3]. Однак при цьому вони здатні до швидкого розгону і плавному гальмування. Вони повинні забезпечувати максимально можливу за умовами безпеки швидкість руху, плавне гальмування, швидке реверсування, високий коефіцієнт корисної дії і надійність. Керування МТ повинне бути простим і зручним. На залізницях України експлуатуються в основному тепловози, що були виготовлені у минулому столітті. Розподіл експлуатаційного парку маневрових тепловозів за роками виробництва наведений на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Розподіл маневрових тепловозів у експлуатаційному парку АТ «Укрзалізниця» за роками випуску

МТ можуть мати різну конструкцію. Визначити різновид можна за позначенням серії. Зазвичай це ТЕМ та ЧМЕ. Окремо виділяють тепловози групи – ТГМ. Існують і інші серії маневрових тепловозів, однак згадані вище складають основний парк локомотивів цього типу.

Маневрові локомотиви ТЕМ [4], класифікуються на: призначені для важкої маневрової роботи (ТЕМ7, 7А) та універсальні (ТЕМ2 і ТЕМ18). Тепловози маневрові ТЕМ7 і ТЕМ7А (рис. 1.2) випускаються Людовинським тепловозобудівним заводом. Основною відмінною особливістю їх конструкції є восьмивісна екіпажна частина.



Рисунок 1.2 – Маневровий тепловоз ТЕМ7А

Тепловози маневрові ТЕМ2 (рис. 1.3) і ТЕМ18 різних індексів підходять для виконання практично всіх видів маневрових робіт [5]. Вперше локомотиви подібної конструкції почали випускатися ще в 1941 році в Америці. У США такі тепловози маркувалися RSD1, у нас в країні – ДА. Після закінчення війни локомотиви цієї конструкції почали випускатися на Харківському заводі. Перша серія називалася ТЕ1. Пізніше на Брянському заводі були розроблені більш досконалі машини ТЕМ1. На даний момент різного роду маневрові роботи виконуються ще більш потужними і продуктивними ТЕМ2 і ТЕМ18. Працюють такі локомотиви на дизелі Д50 і передачі постійного струму [6].



Рисунок 1.3 – Маневровий тепловоз ТЕМ2

Всі частини кузова тепловоза ТЕМ2 змонтовані на головній рамі, що служить також для передачі поздовжніх сил через автозчеплення СА-3, встановлені на кінцях рами. Головна рама спирається на два тривісні візки, на кожен через чотири плоскі ковзаючі опори. На головній рамі тепловоза змонтований дизель-генераторний агрегат ПДГ-1М, що складається з дизеля ПД-1М Пензенського дизельного заводу і тягового генератора. Генератор ГП-300Б постійного струму з незалежним збудженням і самовентиляцією має вісім головних і вісім додаткових полюсів. Дизель ПД-1М (6ЧН31,8/33) чотиритактний, шестициліндровий, з газотурбінним наддувом. Тягові електродвигуни ЕД-118А при роботі на тепловозах ТЕМ2 розвивають номінальну потужність 105 кВт (напруга 203/290 В, струм 605/424 А). Тягові електродвигуни завжди пов'язані по три послідовно, тобто до генератора приєднані два паралельні ланцюги електродвигунів [7].

Устаткування тепловоза ТЕМ18 (рис. 1.4) монтується на головній рамі, яка встановлюється на дві безщелепні тривісні уніфіковані тепловозні візки, кожна з якої має чотири опори [8]. Всі осі візків ведучі. Діаметр коліс 1050 мм. Кузов тепловоза капотного типу і складається з п'яти частин: холодильної камери, кузова над дизелем, кузова над високовольтної

камерою, кабіни машиніста і кузова над акумуляторним приміщенням. У кабіні машиніста розташований пульт, на якому встановлені прилади управління і контрольно-вимірювальні прилади для контролю за роботою силової установки і гальмівного обладнання.



Рисунок 1.4 – Маневровий тепловоз ТЕМ18

Крім основного пульта тепловоз обладнується додатковими пультами управління і дистанційним приводом контролера. Електрична передача складається з тягового генератора постійного струму, шести тягових електродвигунів, двухмашинного агрегату і електроапаратури. Тяговий генератор служить також для пуску дизеля, при цьому генератор працює в режимі електродвигуна, отримуючи живлення від акумуляторної батареї, розташованої в окремому приміщенні за кабіною машиніста [9]. Двухмашинні агрегат складається з допоміжного генератора і збудника. Електрична апаратура розміщена в високовольтної камері, розташованої попереду кабіни машиніста. Електрична схема передбачає з'єднання тягових електродвигунів в дві паралельні групи по три електродвигуна в кожній, також два ступені ослаблення поля тягових електродвигунів.

Чеські локомотиви ЧМЕ2 і ЧМЕ3 складають основну частину парку локомотивів для виконання маневрових робіт. За своїми технічними

характеристиками вони схожі з ТЕМ2. Передачу струму, як і ТЕМ, ЧМЕ мають застарілу – постійного струму. Поставлялися такі локомотиви до нас в країну з Чехії з 1967 року. У більшості випадків ці маневрові тепловози обладнані одним чеським двигуном. Тепловози ЧМЕ2 найчастіше використовуються для звичайної маневрової роботи. ЧМЕ3 задіють для важких і вивізних операцій. Головним чином ця серія машин, як і ТЕМ, використовується на станціях залізниць. Промислові підприємства вони обслуговують рідко і в основному тільки в порядку оренди [10].

Тепловози ЧМЕ2 (рис. 1.5) знаходять все більш меншого застосування через їх моральне та фізичне зношення. Недостатня потужність і зчїпна вага тепловозів ЧМЕ2 для маневрової роботи з вантажними поїздами привели до необхідності проектування і будівництва на заводах ЧКД-Прага сильніших локомотивів [11]. Спочатку передбачалося, що такими локомотивами стануть тепловози з дизелем потужністю 1300 л. с. і гідравлічною передачею типу 2-2. До 1961 року завод ЧКД-Соколово побудував кілька подібних тепловозів (тепловози серії Т444 і Т449), але вони мали обмежену зчїпну вагу 56-76 т і вимагали доопрацювання гідравлічної передачі. Тому було прийнято рішення про будівництво для шестивісних маневрових тепловозів з електричною передачею.



Рисунок 1.5 – Маневровий тепловоз ЧМЕ2



Рисунок 1.6 – Маневровий тепловоз ЧМЕЗ

Тепловоз ЧМЕЗ – чехословацький маневровий тепловоз загальний вид якого представлений на рис. 1.6, а технічні характеристики зведені в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики тепловоза ЧМЕЗ

Рід служби	маневровий
Зчїпна маса, т	123
Конструкційна швидкість, км/год	95
Сила тяги, кгс	23000
Потужність, к.с.	970
Швидкість тривалого режиму, км/год	11,4
Тягові електродвигуни	ТЕ-006
Підвішування ТЕД	опорно-осьове
Діаметр колїс, мм	1050
Дизель	К6S310DR
Номїнальна потужність дизеля, к.с.	1350
Тип передачі	електрична
Генератор	TD-802
Потужність генератора, кВт	885

На тепловозі встановлений шестициліндровий чотиритактний дизель К6S310DR з вертикальним розташуванням цилїндрів. Потужність дизеля К6S310DR збільшена до 1350 л. с. при збереженні частоти обертання валу

750 об/хв за рахунок застосування наддуву [12]. Регулятор потужності дизеля відцентровий з гідравлічним мультиплікатором і компенсатором потужності. Пуск дизеля здійснюється головним генератором від акумуляторної батареї. Дизель приводить в обертання головний генератор TD-802 з незалежним збудженням. Тягові електродвигуни ТЕ-006 чотириполюсні з послідовним збудженням і незалежної вентиляцією. Тягові електродвигуни попарно з'єднані послідовно, а три групи їх - між собою паралельно. Крім «повного» поля, передбачена робота на двох ступенях «ослабленого» поля [13].

Тепловози ЧМЕЗ випускалися до 1987 року. Потім розпочався випуск модифікацій даної серії локомотивів, ЧМЕЗ^М, ЧМЕЗ^Т, ЧМЕЗ^Э.

З метою підвищення економічності тепловоза ЧМЕЗ конструкторам довелося зайнятися перепроєктуванням машини. По новому проекту в 1977 році побудували два дослідних тепловоза ЧМЕЗ^М. Після випробувань вони надійшли для дослідної експлуатації в депо Любліно.

Потужність дизеля виросла до 1500 к.с., суттєвих змін зазнала електрична частина тепловоза, змінили деякі параметри конструкції (довжина рами, ширина колісної бази візків). Службова маса тепловоза збільшилась з 123 до 126 т, запас палива збільшився з 5000 до 6000 кг. Максимальна швидкість зросла на 15 км/год, з 85 до 100 км/год.

З 1987 року розпочався випуск тепловозів ЧМЕЗ^Э. На тепловозах ЧМЕЗ^Э так як, і на ЧМЭЗ^Т, встановлене електронне обладнання, яке забезпечує реалізацію максимальної потужності дизеля на низькій частоті обертання колінчастого валу, яке не було встановлене на тепловозах ЧМЕЗ, але відсутнє реостатне гальмо [14].

У 2008 році Ярославським електровозоремонтним заводом була проведена модернізація тепловоза ЧМЕЗ- 4342, в ході якої стара ДГУ була замінена на дві сучасних виробництва Ярославського моторного заводу. У зв'язку з цим був підданий модернізації капот кузова, кабіна машиніста та додані світлодіодні буферні ліхтарі.

Проект модернізації ЧМЕЗ двома дизель-генераторними установками отримав подальший розвиток у вигляді створення трьох дизельного тепловоза. Цим тепловозом став модернізований тепловоз ЧМЕЗ-3323, що став експонатом III міжнародного залізничного салону «ЭКСПО 1520». Основною відмінністю від модернізації тепловозу ЧМЕЗ-4342 стало встановлення додаткового дизель-генератора потужністю 25 кВт, що працює для забезпечення власних потреб при стоянці і вимкнених основних дизель-генераторних установках. Модернізація тепловозів ЧМЕЗ дизелями Caterpillar з кожним роком становиться все більш популярною в різних країнах [15].

Найбільше розповсюдження отримав варіант комплексної модернізації тепловоза із застосуванням дизельного двигуна Caterpillar 3512B, який в Україні отримав позначення ЧМЕЗ^П (в країнах Прибалтики - ЧМЕЗ^М, в Білорусії - ТМЕ1). Модернізований шестивісний тепловоз типу ЧМЕЗ^П призначений для важкої маневрової служби та вивізної роботи на загальнодержавних, регіональних та інших залізничних шляхах з шириною колії 1520 мм.

Станом на 2018 рік тепловози ЧМЕЗ (в Україні) крім своїх основних функцій, часто використовуються, як локомотиви приміських поїздів на коротких малозадіяних ділянках.

Оскільки локомотив виконаний в габариті європейської колії, багато тепловозів даної серії використовують на євроколії в прикордонних районах України, Білорусії, Росії та прибалтійських країн де перетинаються колії 1520 і 1435 мм.

Основною відмінною особливістю конструкції локомотивів ТГМ є наявність гідропередачі. Найбільш затребувані модифікації цієї серії – ТГМ23, ТГМ4 і ТГМ6 [16]. Використовуються маневрові тепловози ТГМ в основному на промислових підприємствах. Проте тепловози з гідравлічною передачею все менш застосовуються через складність виготовлення, обслуговування та ремонту тягової передачі. Більшість промислових

підприємств залізничного транспорту віддають перевагу тепловозам серії ТЕМ.

Тепловоз ТГМ4 (рис. 1.7) призначений для маневрових робіт і технологічних робіт на залізницях різного роду підприємств. Устаткування тепловозів змонтовано на зварений рамі, яка передає навантаження на рейки через двовісні візки, всі осі яких рушійні. Кузов тепловоза капотного типу. У ньому розташовані машинне відділення і кабіна машиніста, відсік для установки акумуляторів, холодильна камера [17].



Рисунок 1.7 – Маневровий тепловоз з гідравлічною передачею ТГМ4

На тепловозі встановлений дизель 6ЧН 21/21 чотиритактний з рядним розташуванням циліндрів, водяного охолодження, з турбінним наддувом і холодильником наддувочного повітря. Запускають двигун електростартером. Тепловоз ТГМ4 оснащений УГП (уніфікованою гідропередачею), яка з'єднана з дизелем через еластичну муфту. Гідропередача дозволяє здійснити два режими для руху: поїзний і маневровий і звичайно реверсування на кожному режимі.

Перший тепловоз ТГМ6 (рис. 1.8) був створений у 1966 році на Людиновском заводі. Кузов тепловозів ТГМ6 і всіх його модифікацій

капотного типу. Локомотив обладнаний двома двовісними візками, на які спирається зварна рама тепловоза.



Рисунок 1.8 – Маневровий тепловоз з гідравлічною передачею ТГМ6

На тепловозах застосований дизель типу Д49 – 8-ми циліндровий, V-подібний, з наддувом. Сам дизель постійно передає крутний момент на приводний вал гідропередачі. Залежно від модифікації на тепловозі може застосовуватися гідропередача з трьома гідроапаратами (2 гідротрансформатора і 1 гідромуфта) або двома гідроапаратами (2 гідротрансформатора). На всіх тепловозах ТГМ6 і його модифікаціях застосовується компресор ПК-5,25. Компресор приводиться в обертання від валу відбору потужності гідропередачі через гідравлічний редуктор або гідромуфту, яка прифланцована до гідропередачі.

Аналіз сучасного стану й напрямків розвитку залізничного транспорту України показує, що його технічна база й технологічний рівень організації перевезень по багатьом параметрам не відповідає потребам суспільства і європейським стандартам якості транспортних послуг.

Більшість локомотивів, що знаходяться в експлуатації, потребують на 40-60% більших витрат на технічне обслуговування й ремонти в порівнянні з сучасними закордонними моделями. Заходи, що приймалися для стабілізації

залізничного комплексу, не змогли зупинити критичний знос основних фондів залізниць України, і, перш за все, рухомого складу, який за період з 1992 р. збільшився з 38% до 80%. З існуючого парку локомотивів термін служби, що був назначений заводами-виробниками, вироблений на 89,3 % електровозами, а тепловозами – на 99,3%.

1.2 Закордонні маневрові тепловози

Перспективним напрямком розвитку тепловозобудування є технологія GenSet. Такий тип локомотивів характеризується використанням низки дизельних двигунів замість одного великого. Локомотивобудівні компанії можуть створювати модельний ряд локомотивів різної потужності, з найнижчою потужністю при використанні одного дизель-генератора та найвищою – декількох таких установок [18].

Кілька дизель-генераторних установок налаштовуються за допомогою передових комп'ютерних технологій, для забезпечення певного алгоритму їх роботи з метою реалізації необхідної потужності. Відключення дизельних двигунів під час малого споживання потужності тепловозом дає змогу значно знизити витрати палива локомотивом та викиди в атмосферу.

У теперішніх конфігураціях GenSet використовуються два або три малопотужних дизеля та генератора для заміни однієї штатної потужної силової установки. Кілька виробників Genset мають гібридні моделі, які замінюють один або декілька дизельних двигунів акумуляторними батареями, щоб ще більше зменшити споживання палива та викиди.

За наведеною технологією виробляються тепловози такими тепловозобудівними компаніями, як NRE N-ViroMotive Series, Grindrod Locomotives, Railserve Leaf, MotivePower Industries, Railpower Technologies, Bombardier Transportation та інші.

Перевагами технології Genset є:

- економія палива більш ніж на 20% у порівнянні з існуючою технологією, що застосовується на традиційних тепловозах;

- порівняно з традиційним локомотивом у тому ж застосуванні, спостерігається зменшення локомотивами GenSet викидів NOx на 58%, HC на 94%, CO на 37% і PM на 80%

- можливість регулювання тягових зусиль для задоволення необхідних умов роботи;

- модульна конструкція дозволяє виконувати швидку заміну дизельного двигуна або генератора.

Одними з представників такого типу маневрових тепловозів є дводизельні тепловози RP20CH, RP20BH та трьохдизельні – RP14BD, RP20BD, RP20CD.

RP20CD – маневровий дизель-електричний локомотив, що має три дизель-генераторні установки. Дизельні двигуни управляються центральним комп'ютером, який зупиняє та запускає двигуни в залежності від навантаження у кожен момент часу. RP20CD (рис. 1.9) є варіантом модернізації застарілих локомотивів і можуть розвивати до 2700 кінських сил (2,01 МВт) шляхом додавання четвертого дизель-генератора.

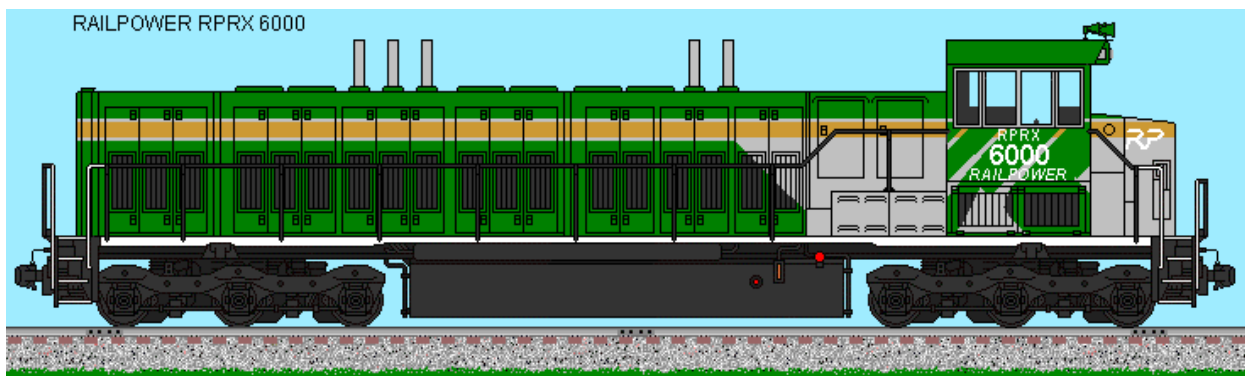


Рисунок 1.9 – Трьохдизельний тепловоз RP20CD

На тепловозі встановлені три чотиритактні дизельні двигуни TSG-2015 (3) V-8 та генератор типу 752RDL. Акумуляторна батарея складається з AGM свинцево-кислотних акумуляторів, номінальна напруга батареї 700В, струм – 1200 А. Маса локомотива складає 178 тонн, а довжина по осях автозчеплення – 20,4 м.

На залізницях Росії першим кроком в цьому напрямку стала розробка дводизельних тепловозів ЧМЕЗ. В даний час 6 одиниць таких локомотивів

експлуатуються на Московській залізниці. Експлуатація таких локомотивів підтвердила їх високі тягові і експлуатаційні характеристики і зниження витрати палива [19].

Наступним етапом підвищення експлуатаційних характеристик маневрових локомотивів стало створення маневрового локомотива з трьохдизельною силовою установкою (рис. 1.10). Вибір трьохдизельної схеми обумовлений тим, що при маневровій роботі до 60% часу силова установка локомотива працює на холостому ході.



Рисунок 1.10 – Маневровий двоох дизельний тепловоз ЧМЕЗ ЕКО

Основна ідея трьохдизельного тепловоза полягає в тому, що при роботі в холостому режимі, працює допоміжний дизель малої потужності (24 кВт), забезпечуючи прогрівання тягових дизелів, кабіни машиніста і власні потреби тепловоза в електроенергії.

На тепловозі ЧМЕЗ з трьохдизельною силовою установкою крім двох основних дизель-генераторних установок потужністю 478 кВт кожна, змонтована ще одна допоміжна установка потужністю 24 кВт.

Загальна система охолодження трьох дизель-генераторів дозволяє забезпечити прогрів двох основних установок, які перебувають в режимі очікування за рахунок працюючого допоміжного дизеля.

Ще одним напрямком розвитку тепловозобудування є розробка та створення маневрових тепловозів із гібридною силовою установкою. Світовими тепловозобудівними компаніями побудована низка таких тепловозів, що експлуатуються на залізницях Європи та Америки.

Проект НЗ Hybrid Shunting Locomotive передбачає розробку і випробування п'яти локомотивів нового покоління на основі гібридних технологій. Вони розробляються Deutsche Bahn та Alstom Deutschland. Проект НЗ Hybrid locomotive було розпочато в серпні 2013 року, а перший локомотив був представлений на InnoTrans 2014 в Берліні.

Локомотив НЗ (рис. 1.11) має довжину 12,8 м, ширину 3,13 м і вагу 67 тонн. Максимальне навантаження на вісь складає 22,5 т., мінімальний радіус кривих, що проходяться, 60 м, включає систему підвіски flexicoil і має початкове тягове зусилля 240 кН. Локомотив може розвивати максимальну швидкість у 100 км/год.

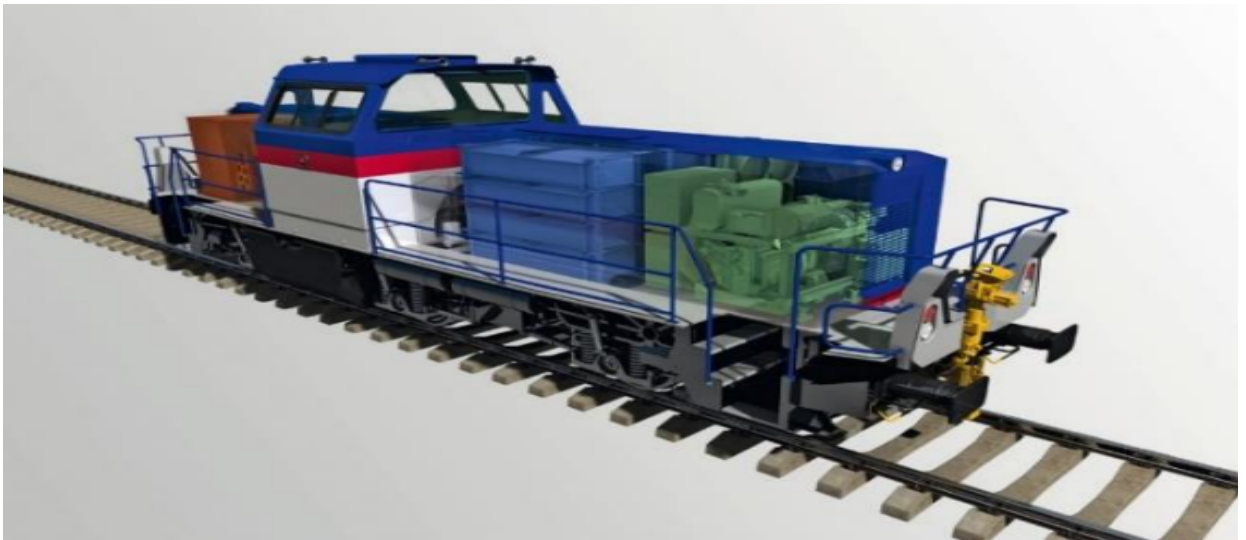


Рисунок 1.11 – Гібридний тепловоз НЗ

Тривісний локомотив випускається в чотирьох варіантах: акумуляторний електровоз НЗ Battery 600 кВт, гібридний тепловоз НЗ Hybrid 700 кВт та двомоторний тепловоз НЗ з двома дизельними двигунами потужністю 700 кВт. У першому варіанті вісім акумуляторних батарей, забезпечують потужність 600 кВт, у другому – 350 кВт забезпечує генератор і 350 кВт – акумулятор, третій має дві дизель-генераторні установки

потужністю 350 кВт. Перші два варіанти призначені для виконання маневрових робіт в чутливих промислових зонах і тунелях, а третій – для промислових об'єктів і магістральних залізниць [20].

Гібридний локомотив НЗ споживає на 50% менше палива, викиди у атмосферу знижені на 70% та зниження шуму складає більш ніж 80% в порівнянні з традиційними локомотивами. Другий варіант може працювати від 50% до 75% часу від акумулятора.

Дизель-генератори другого і третього варіанту потужністю 350 кВт включають фільтри для частинок і відповідають останнім європейським стандартам у питанні викидів шкідливих газів. У той час, як звичайні генератори традиційних локомотивів споживають приблизно 20 л пального на годину, дизель-генератори цього тепловозу працюють приблизно на 9 л пального на годину.

Значний внесок у розвиток тепловозобудівної галузі зробила канадська корпорація Railpower Technologies, яка налагодила виробництво гібридних тепловозів GG10B, GG20B, GK10B.

Гібридні тепловози GG10B, GG20B мають назви Green Kid та Green Goat (рис. 1.12) відповідно. Тепловози були вироблені компанією Railpower Technologies. Всі локомотиви були побудовані за контрактом різних виробників, включаючи SRY, Alstom, Railserve, MPI, CAD Rail і Super Steel.



Рисунок 1.12 – Гібридний тепловоз GG20B Green Goat

Тягова потужність даних локомотивів забезпечується свинцево-кислотними акумуляторними батареями, які розвивають до 1470 кВт (Green Goat) або 735 кВт (Green Kid) протягом декількох хвилин. Дизельний генератор потужністю 220 кВт працює для зарядки акумуляторів. Застосована на даних локомотивах система, де дизель-генератор є основним джерелом енергії функціонує лише при маневрових пересуваннях, де середня потреба потужності набагато нижча, ніж пікова, а пікова потужність потрібна лише протягом декількох хвилин, що дозволяє заряджати батареї раніше ніж виникає повторна потреба у реалізації пікової потужності. Батареї заряджаються повністю дизель-генератором. Енергія гальмування не використовується для зарядки акумуляторів через складність використання енергії при дуже низьких швидкостях.

Перевагами даних локомотивів є:

- зниження споживання пального більш ніж на 50%;
- надзвичайно низькі викиди в порівнянні з існуючими;
- можливість працювати в режимі нульової емісії (відключення дизельного генератора) протягом обмеженого періоду часу, наприклад, при роботі в приміщенні;
- низький рівень шумового забруднення оточуючого середовища.

До недоліків слід віднести:

- високі капітальні витрати в порівнянні зі старим одномоторним тепловозом;
- можливість втратити енергії або пошкодження акумулятора, якщо робочий цикл є достатньо високим, щоб батареї не могли правильно підзаряджатися. Сприйнятливими умовами до розряду батарей при роботі на повній потужності є швидкості не більше 10-15 км/год протягом двох хвилин.
- керування акумулятором не було повністю оптимізовано, коли почалося виробництво, це є причиною виникнення аварійних ситуацій (наприклад, пожеж).

Перший російський гібридний маневровий тепловоз ТЕМ35 (рис. 1.13), був створений на Брянському машинобудівному заводі та успішно пройшов 300-годинний експлуатаційний пробіг [14].



Рисунок 1.13 – Гібридний маневровий тепловоз ТЕМ35

В ході проведених випробувань єдиний в Росії маневровий тепловоз ТЕМ35 з комбінованою (гібридною) силовою установкою показав рекордний для його характеристик результат - ведення складу вагою 7000 т. на сортувальній гірці в локомотивному депо Брянськ-2.

ТЕМ35 – гібридний маневровий тепловоз з асинхронними тяговими двигунами має цілу низку істотних переваг. При однаковій з серійними тепловозами потужності, витрачає палива на 20-30% менше і вимагає на технічне обслуговування менших витрат. Крім того, ТЕМ35 екологічний – використання в конструкції менш потужного дизеля дозволяє істотно скоротити викид шкідливих речовин в атмосферу. Робота гібридного локомотива найбільш ефективна в режимі, який передбачає часті гальмування, зупинки, запуск і розгін тепловоза.

За рахунок електричних накопичувачів збільшується потужність дизеля і, відповідно, його ККД, цей тепловоз дає перевагу попередніх серій.

У нього є ряд вигашних, в порівнянні з іншими машинами, характеристик. Наприклад, скло розташоване під кутом 10 градусів, і зручний круговий огляд збільшує безпеку руху. Створено комфортні умови для роботи машиніста. Є зручна вбудована панель, яка підсвічується в нічний час. Є кондиціонер, передбачений обдув кабіни, запобігання обмерзанню на лобовому склі та інші переваги.

У 2011 році почалася робота над гібридним тепловозом ТЕМ9Н (рис. 1.14). У тепловозі ТЕМ9Н разом з традиційним дизель-генератором використані сучасні накопичувачі енергії – суперконденсатори і супераккумулятори. У тепловозі встановлена одна з найбільших в світі літій-іонних акумуляторних батарей, що складається з 288 послідовно з'єднаних осередків, загальною ємністю 300 А*год і сумарною напругою 1 кВ. Тепловоз може кілька годин працювати тільки від акумуляторної батареї [17].



Рисунок 1.14 – Гібридний тепловоз ТЕМ9Н

Економія палива досягається за рахунок інтелектуального управління джерелами енергії і рекуперації енергії гальмування.

НТЦ «Приводная техника» розробив для ТЕМ9Н комплект перетворювачів, об'єднаних в єдиному конструктиві – модулі (капоті) (рис. 1.15).

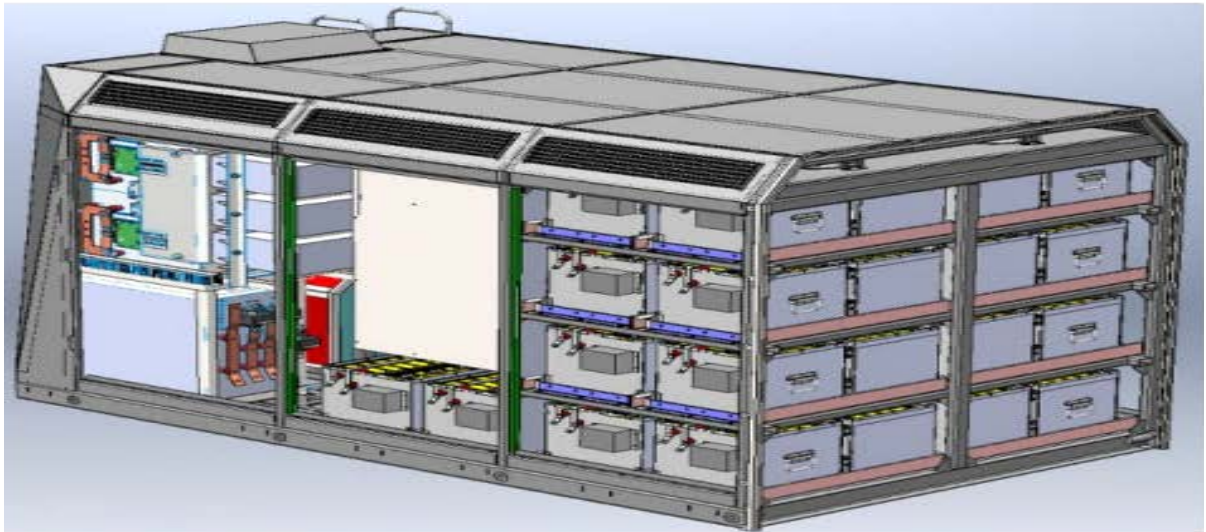


Рисунок 1.15 – Модуль тепловоза ТЕМ9Н

Модуль складається з групи перетворювачів, об'єднаних загальним ланкою постійного струму: випрямного модуля, що перетворює змінну напругу генератора в постійне; перетворювача підвищення напруги для підняття випрямленої напруги генератора до робочої напруги 1100 В; перетворювача зарядно-розрядного пристрою для супераккумуляторної батареї; двох тягових перетворювачів і перетворювачів власних потреб ПСН1, ПСН2, ПСН3 для живлення вентиляторів охолодження дизеля, ТЕД і компресора. Весь цей комплекс пристроїв обслуговують три модуля управління МРВД.

Необхідність дешевої, екологічно чистої локомотивної енергетики призвела до інноваційного розвитку та впровадження різних альтернативних локомотивних конструкцій. У 2008 році у США відбулось значне зростання вартості викопного палива. Цей підйом витрат на паливо в поєднанні з необхідністю більш екологічно чистого палива призвів до розробки та демонстрації наступних трьох енергетичних технологій для застосування на залізниці: паливні елементи, біодизель та свинцево-кислотний акумулятор.

Енергія паливних елементів з нульовим викидом для локомотивів поєднує в собі екологічні переваги контактного електричного локомотива з більшою загальною енергоефективністю та зниженням вартості інфраструктури, як для дизель-електричної. Vehicles Project Inc., BNSF

Railroad і Американська армійська корпорація інженерів будівельної інженерії дослідної лабораторії (CERL) співпрацювали над розробкою паливних елементів для локомотивів, які: зменшують забруднення повітря в міських районах, зменшують викиди парникових газів в атмосферу і слугують мобільним джерелом резервного джерела живлення ("power-to-grid") для критичної інфраструктури на військових базах та для за умов ліквідації наслідків катастроф.

Локомотив з паливними елементами був побудований на платформі маневрового тепловоза Green Goat™. При масі 127 тонн, локомотив виробляє безперервну потужність 250 кВт із прототипної обмінної мембрани на паливних елементах, а перехідна потужність перевищує 1 МВт. Інтеграція повної системи паливних елементів у локомотив показана на рис. 1.16.

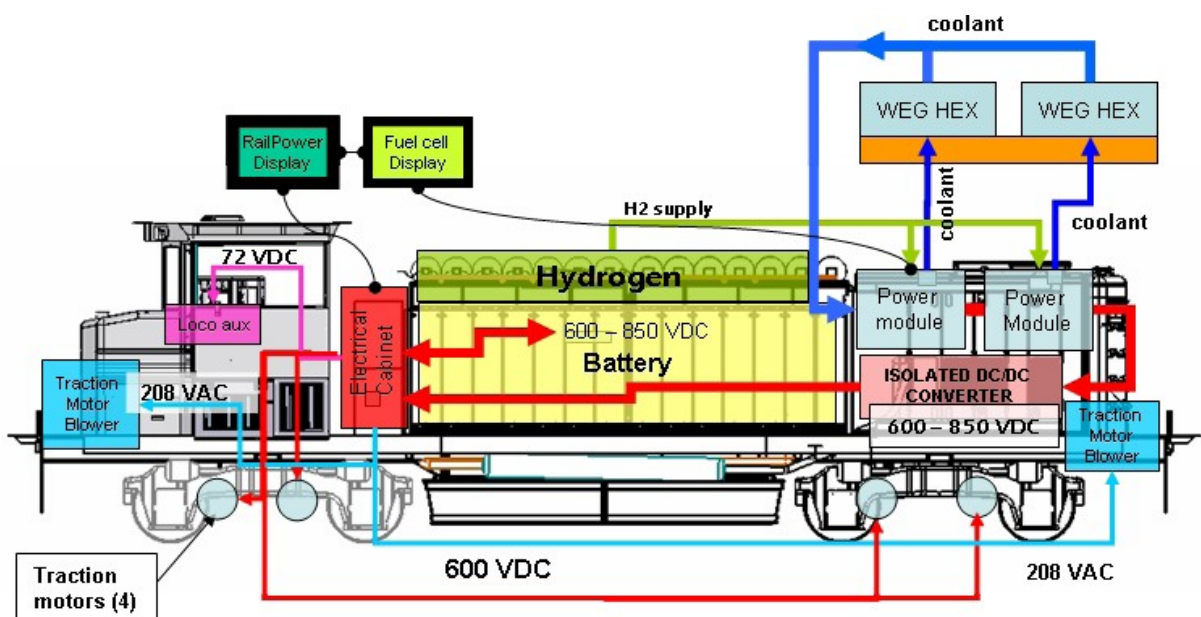


Рисунок 1.16 – Система гібридного локомотива з паливними елементами

У задньому відсіку розташована енергетична установка паливних елементів, система охолодження та перетворювач потужності. Чотирнадцять збірних резервуарів з вуглецевого волокна, розташованих над батареєю, зберігають в загальній складності 70 кг водню при тиску 350 бар. Обидва перетворювача потужності паливної комірки та тягової батареї постачають живлення до однієї високовольтної шини, яка потім розподіляє потужність на існуючі тепловозні системи, а також на тягові двигуни напругою 600 В

постійного струму. Локомотив з паливними елементами складається з п'яти болтових модулів: енергетичної установки для паливних комірок, перетворювача потужності DC/DC, модуля охолодження та двох модулів зберігання водню. Випробування показали, що використання технології водневих паливних елементів для забезпечення тягової сили на залізницях є технічно здійсненним та досить перспективним напрямком [19].

Ще одним шляхом створення енергоефективного маневрового тепловоза є використання у його конструкції відновлювальних джерел енергії. У Нідерландах компанія Strukton Rail Equipment почала експерименти по застосуванню сонячної енергії на рухомому складі залізничного транспорту. Розроблено концепцію використання сонячних батарей на локомотивах.

Для проведення випробувань був обраний побудований у 1963 р компанією Deutz чотиривісний тепловоз серії 1200BVM, який отримав назву Janine (рис. 1.17), потужністю 808 кВт з кабіною управління, розташованої в центральній частині капотного кузова. Сонячна батарея встановлена на капоті тепловоза таким чином, щоб дим з вихлопної труби не закривав сонячне світло, що могло б вплинути на її роботу. Розміри сонячної батареї 1920x990x50 мм, потужність – 280 Вт при напрузі 24 В.



Рисунок 1.17 – Маневровий тепловоз із сонячною батареєю

Метою випробувань була оцінка скорочення емісії вуглекислого газу, зменшення витрат палива, зниження рівня шуму, підвищення надійності та експлуатаційної готовності. Ще до повного завершення випробувань було виявлено безперечні переваги нової технології. Поліпшено показники експлуатаційної готовності. Локомотив застосовується для виконання робіт з поточного утримання інфраструктури, тобто нерегулярно. Це означає, що поки локомотив не використовується, акумулятори розряджаються. При наявності сонячних батарей акумулятори можуть постійно підзаряджатися. Випробування були розпочаті в холодних зимових умовах, і з тих пір, незважаючи на низькі температури, не було необхідності в заміні батарей.

Акумуляторні батареї необхідні не тільки для пуску локомотива, а й для живлення допоміжного обладнання. При вимкненому дизелі потужність навантаження, підключеної до батареї, може бути збільшена. Застосування сонячної батареї дозволяє швидко заряджати акумулятор в більшості ситуацій.

Підвищення надійності сприяє скороченню експлуатаційних витрат. У зв'язку з цим відпадає необхідність витратити робочий час персоналу на виїзд до локомотива і заміну на ньому акумуляторних батарей після того, як він протягом деякого часу не використовувався. Потреба в нових акумуляторах з початком дослідної експлуатації сонячних батарей також знизилася.

З наведеного аналізу можна зробити висновок, що у тепловозобудівній галузі спостерігаються тенденції підвищення енергоефективності та екологічності нового рухомого складу. Це досягається в основному зменшенням потужності дизель-генераторної установки та застосуванням різного типу накопичувачів енергії.

1.3 Обґрунтування шляху модернізації маневрового тепловоза ЧМЕЗ

Як показує практика на сьогоднішній день більше 90% всієї маневрової роботи на залізницях України виконується маневровими тепловозами ЧМЕЗ, а тому модернізація на базі такого локомотива є найбільш доцільною [7].

Як показує статистика, більше 40% маневрової роботи приходить на простій тепловоза ЧМЕЗ з двигуном, що працює, а 10-15% часу приходить на пересування без вагонів. Розподілення режимів роботи маневрового локомотива показано на рисунку 1.18.

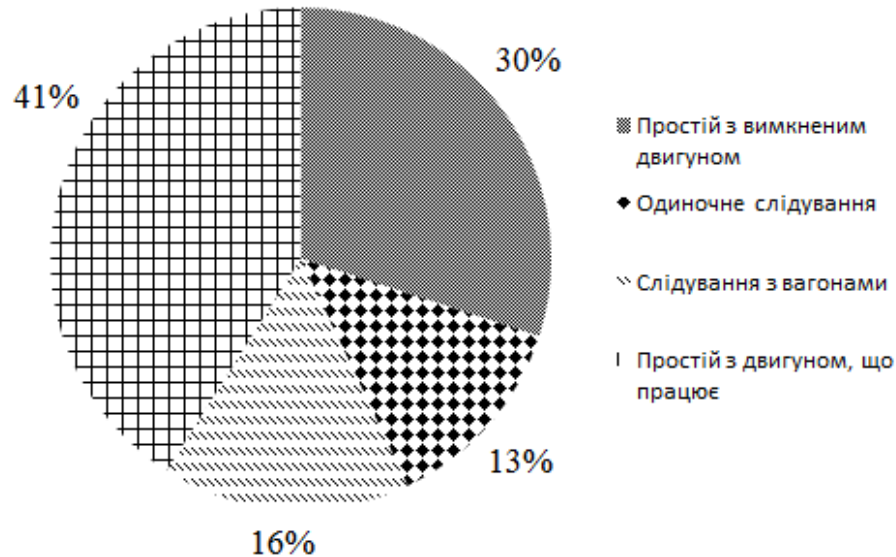


Рисунок 1.18 – Розподілення режимів роботи маневрового локомотива

З наведеного рисунку 1.18 видно, що застосування потужних маневрових тепловозів не оправдане економічно, бо використання тепловозів при частковому завантаженні веде до перевитрат палива. Тому перехід до гібридної системи з дизель-генераторною установкою невеликої потужності є найбільш перспективним напрямком сьогодення.

Гібридні локомотиви (або транспортні засоби з комбінованою енергоустановкою) займають проміжне положення між традиційним локомотивом (з двигуном внутрішнього згорання) і електровозом (живлення якого відбувається від контактної мережі). Гібрид складається з двох і більше джерел енергії: дизель-генераторної установки, акумулятора, буферного накопичувача і т. д.

Аналіз альтернативних варіантів приводу нового покоління показав: реальною можливістю створити конкурентоспроможний транспортний засіб є використання комбінованої енергоустановки. Така установка, що складається з двигуна внутрішнього згорання, 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 скоротити витрату палива не менше ніж на 40%, так як більша частина маневрової роботи буде здійснюватися на живленні від тягової акумуляторної батареї, і забезпечити високу екологічну чистоту локомотива.

На рисунку 1.19 наведена функціональна схема гібридного тепловоза, що включає в себе: дизель, синхронний стартер-генератор, випрямляч, накопичувач енергії (акумуляторна батарея, іоністори), статичний перетворювач та тяговий двигун, в якості якого може використовуватись як двигун постійного так і змінного струмів.

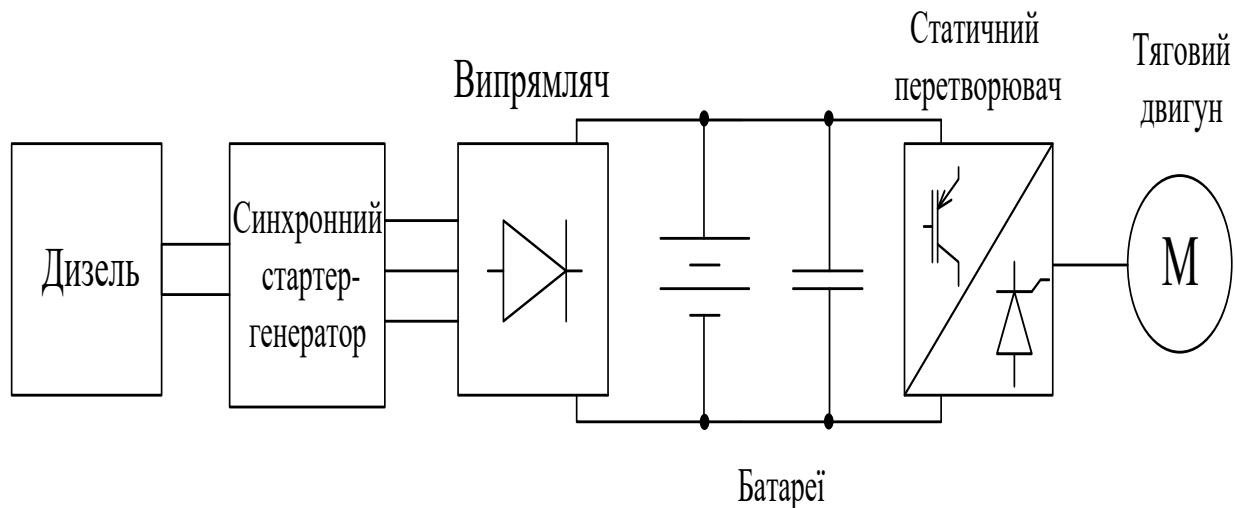


Рисунок 1.19 – Функціональна схема гібридного тепловоза

Використання у системі накопичувачів енергії дозволяє відмовитися від систем регулювання обертів дизеля на користь систем керування тяговими двигунами. У наведеному тепловозі дизель включається тільки у режимах руху з важкими поїздами та працює на номінальних обертах із номінальним споживанням палива.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

Ефективне споживання 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 [1].

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.

Основна частка витрат паливно-енергетичних ресурсів в ПАТ «Укрзалізниця» доводиться на тягу поїздів. Сьогодні це 82% всього обсягу споживання компанією електроенергії і 90% дизельного палива [2]. 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 залізниці та вимагає подальших досліджень.

Не зважаючи на вище сказане, парк МТ Укрзалізниці 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.

Основними вимогами до маневрових локомотивів нового покоління даної потужності є:

- ✓ максимальне використання енергії на створення сили тяги, мінімізація енергетичних витрат на допоміжні потреби і витрат на придбання паливно-мастильних матеріалів;
- ✓ мінімізація трудових витрат протягом життєвого циклу, включаючи витрати на обслуговування і ремонти всіх видів;
- ✓ високі екологічні та ергономічні якості, що задовольняють чинним і перспективним вітчизняним і світовим стандартам.

З метою відповідності наведеним вимогам світовими компаніями у галузі локомотивобудування прослідковується тенденція впровадження гібридних передач потужності на залізничному транспорті. Проте, усі МТ, що експлуатуються в Україні, мають передачу без НЕ. Разом з цим використання потужних маневрових тепловозів не оправдане економічно, тому що застосування тепловозів при частковому завантаженні веде до перевитрат палива.

МТ окрім маневрової роботи на станціях 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. Підвищення швидкості в поєднанні з витратами паливно-енергетичних ресурсів обумовлює потребу в наукових дослідженнях, а саме:

- ✓ створення імітаційної моделі роботи МТ, отримання основних характеристик та їх аналіз;
- ✓ вибір найбільш перспективних напрямків модернізації та розробка комплексу технічних рішень направлених на збільшення як швидкості руху тепловоза, так і його енергоефективності;
- ✓ розробка та створення імітаційних моделей складових гібридного тепловозу: дизель-генераторної установки, накопичувачів енергії, тягового електроприводу на базі вентильно-індукторного електромеханічного перетворювача енергії;
- ✓ порівняльний аналіз основних якісних та кількісних показників роботи двох досліджуваних систем;
- ✓ синтез регуляторів швидкості та оцінка якості їх роботи;
- ✓ розробка системи керування, що дозволяє підтримувати задану тахограму руху, захист двигуна від перевантаження та узгодження роботи складових гібридної установки;
- ✓ проведення лабораторних досліджень на базі розробленої фізичної моделі електроприводу локомотива.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТЕПЛОВОЗУ ЧМЕЗ

Розділ присвячений розробці математичної моделі роботи маневрового тепловозу ЧМЕЗ, а саме:

- 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;
- дизеля з використанням сімейства індикаторних діаграм;
- генератора постійного струму зі збуджувачем;
- тягового електричного приводу з урахуванням сил, що діють на потяг, профілю шляху.

Для моделювання у якості вихідних даних взяті параметри таких конструкційних елементів тепловозу ЧМЕЗ: дизель K6S310DR, генератор постійного струму TD-802, тяговий ДПС послідовного збудження ТЕ-006. Імітаційна модель використовувалась як інструмент при отриманні основних осцилограм роботи тепловозу.

2.1 Структурна схема імітаційної моделі тепловоза

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 2.1.

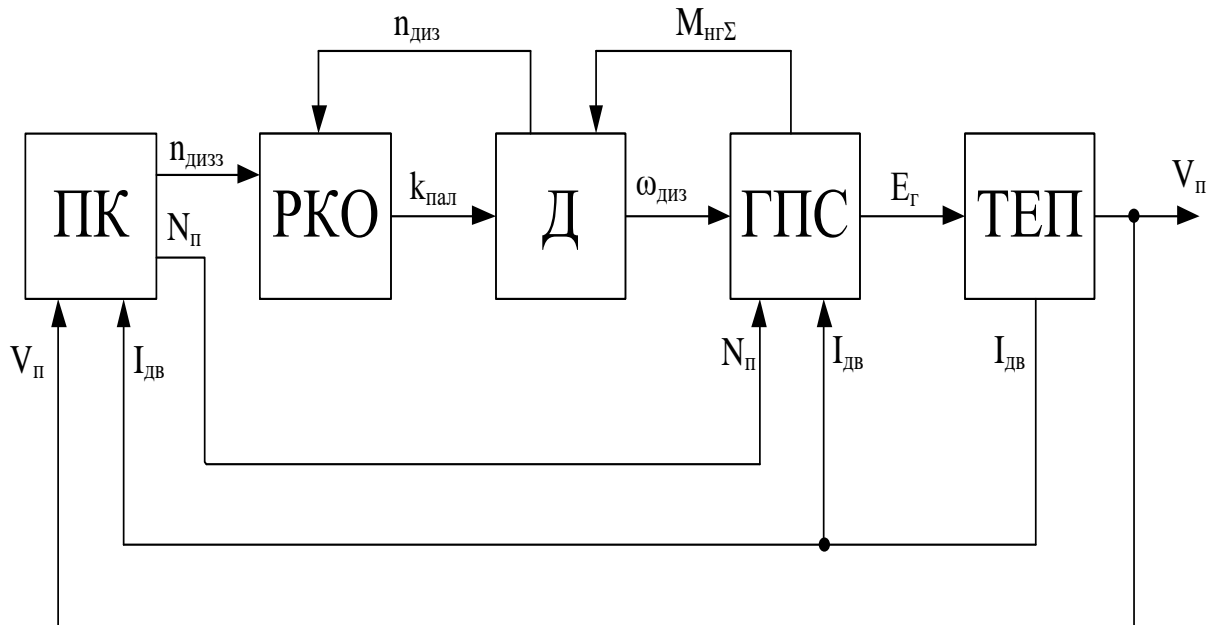


Рисунок 2.1 – Структурна схема моделі тепловозу ЧМЕЗ: ПК – пульт керування; РКО – регулятор кількості обертів дизеля; Д – дизель; ГПС – генератор постійного струму зі збуджувачем; ТЕП – тяговий електропривод

Вхідними параметрами для блоку ПК є швидкість поїзда V_n та струм двигуна $I_{дв}$, від величин яких залежить номер позиції контролера машиніста N_n 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_n та $I_{дв}$. На виході ТЕП формується значення V_n .

2.2 Імітаційна модель пульта керування

Пульт машиніста тепловозу ЧМЕЗ має 8 позицій зміни напруги на тягових двигунах та дві позиції послаблення поля. На кожній позиції за допомогою автоматичних регуляторів підтримуються сталі значення частоти обертання колінчастого валу дизеля та напруги на клеммах збуджувача, які наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Номінальні параметри дизеля та збуджувача, в залежності від позиції контролера машиніста

Позиція контролера машиніста	Кількість обертів колінчастого валу дизеля, об/хв	Напруга на затискачах збуджувача, В
1	380	45
2	420	48
3	460	53
4	510	57
5	560	62
6	660	68
7	750	76
8	350	90

Змодельований пульт керування здійснює переключення позицій контролера машиніста в залежності від двох координат, а саме: струму двигунів та швидкості руху поїзда [21].

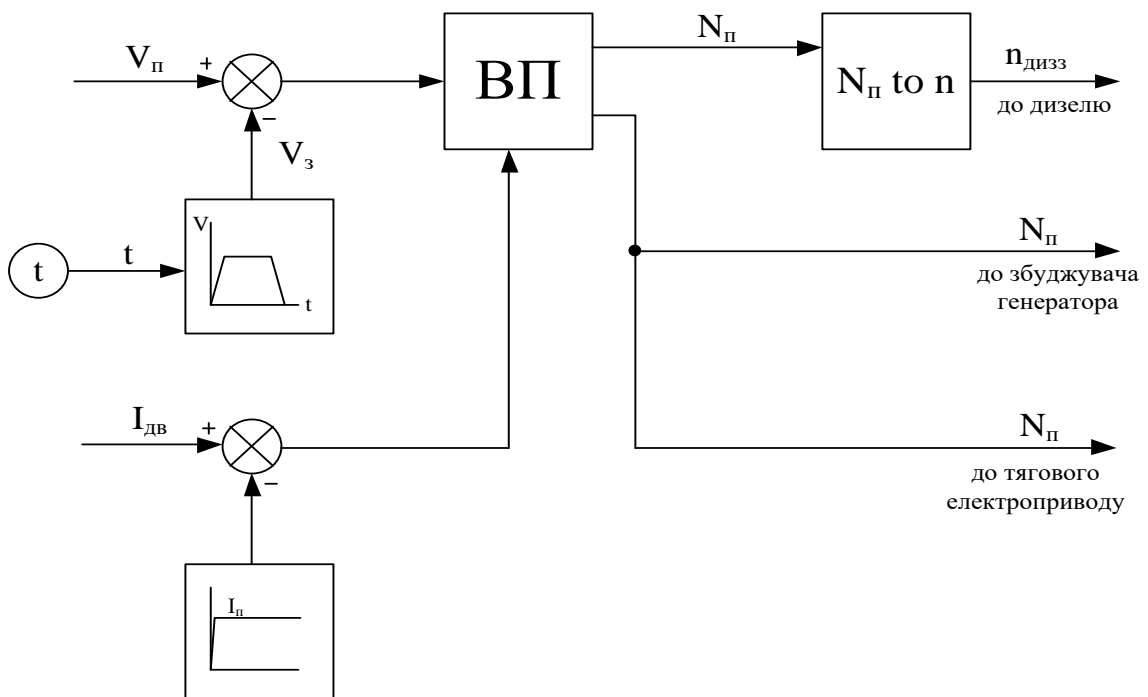


Рисунок 2.2 – Структурна схема моделі пульта керування

Вибір позиції контролера машиніста відбувається у блоку ВП. Вхідними величинами для цього блоку є: різниця між реальною швидкістю поїзда і

заданою за тахограмою та різниця між струмом обмеження та струмом двигуна. Для виключення можливості занадто частого переключення позицій аналіз необхідності переключення відбувається з інтервалом 1 с.

Блок-схема алгоритму роботи БП наведена на рисунку 2.3.

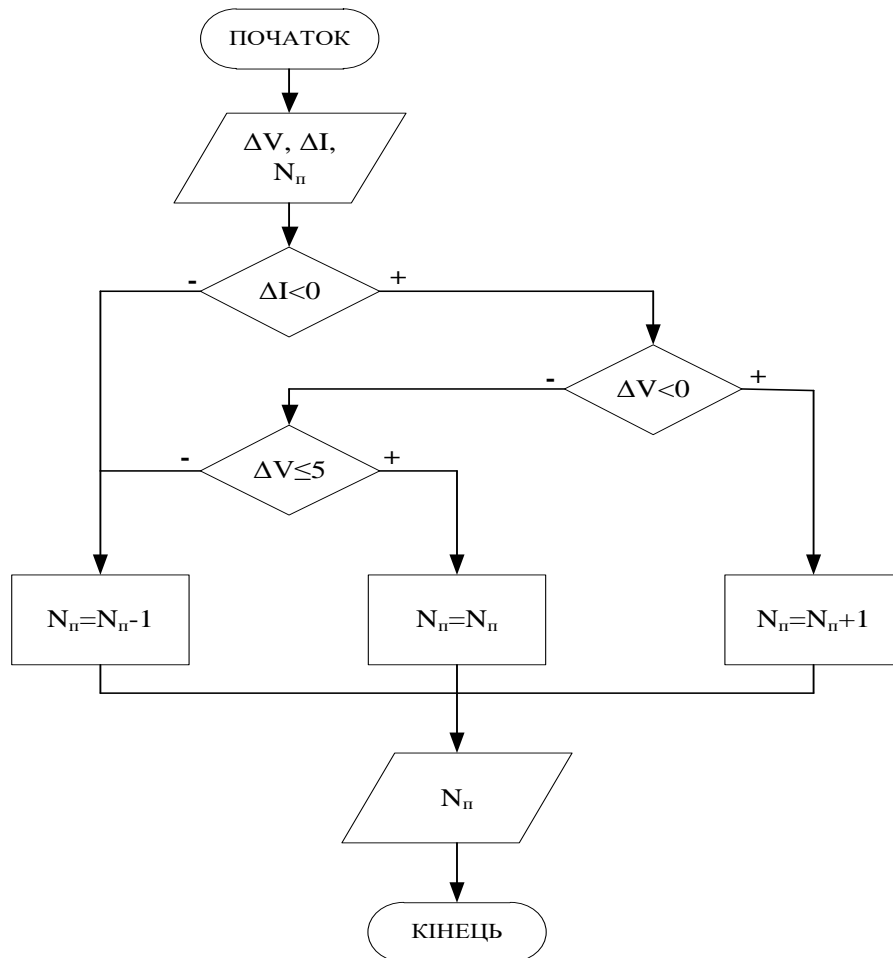


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритму роботи блоку вибору позиції

БП реалізує можливість поступового набору або скидання позицій для підтримання заданої швидкості. Для виключення великої кількості переключень у сталому режимі, коли фактична швидкість близька до заданої, встановлена мертва зона у 5 км/год, у якій не відбувається переключень, а рух здійснюється на обраній раніше позиції.

2.3 Імітаційна модель регулятора кількості обертів дизеля

Потужність будь-якого двигуна внутрішнього згорання залежить від його конструкції, тиску газів у циліндрі та частоти обертання колінчастого валу [22]. Тиск газів у циліндрі під час робочого ходу залежить поршня залежить від кількості палива, що подається насосом високого тиску через

форсунку. Тому зміна потужності відбувається за рахунок зміни подачі палива насосом шляхом переміщення його рейки. Рейки усіх паливних насосів з'єднані із загальним валом, яким керує спеціальний регулятор. Дистанційне керування дизелем за допомогою контролера машиніста дозволяє отримати вісім ступенів потужності від 73,5 до 993 кВт [23].

Усі дизелі за характером своєї роботи дуже чутливі до зміни навантаження. Збільшення навантаження на дизель викликає зниження частоти обертання колінчастого валу («просадку обертів»), що може призвести до зупинки дизеля, а зменшення навантаження супроводжується різким зростанням частоти обертання валу, тобто дизель може піти у «рознос».

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

Встановлений на дизелі K6S310DR відцентровий всережимний регулятор непрямої дії захищає його від перевантаження, виконуючи функції регулятора потужності. Структурна схема імітаційної моделі регулятора наведена на рисунку 2.4.

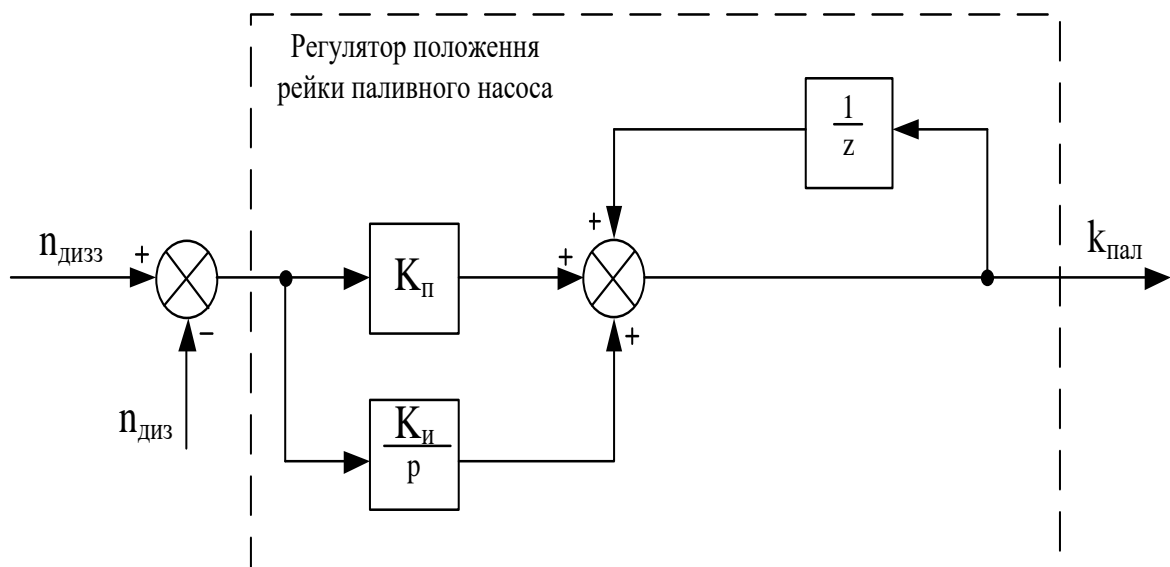


Рисунок 2.4 – Структурна схема моделі регулятора обертів дизеля

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

2.4 Імітаційна модель дизеля K6S310DR

На тепловозах ЧМЕЗ встановлений чотиритактний дизель K6S310DR з вертикальним розміщенням циліндрів та водяним охолодженням. Буква К означає, що дизель має надув. Основні технічні характеристики дизеля наведені у таблиці 2.2 [14, 15].

В основу імітаційної моделі дизеля покладена індикаторна діаграма його роботи. Дані, що наведені у таблиці 2.2 є вхідними для розрахунку та побудови діаграми.

Процеси, що відбуваються в циліндрах поршневого двигуна, можуть бути зображені у вигляді індикаторної діаграми. Індикаторна діаграма – це графічне відображення зміни тиску газу в циліндрі поршневого двигуна в залежності від переміщення поршня або кута повороту кривошипу.

Таблиця 2.2 – Основні технічні характеристики дизеля K6S310DR

Найменування параметру	Значення
Номінальна потужність, кВт	993
Номінальна частота обертання колінчастого валу, об/хв	750
Кількість циліндрів	6
Діаметр розточки циліндрів, мм	310
Хід поршня, мм	360
Повний об'єм циліндрів, л	177
Ступінь стискання	13
Діапазон робочих частот, об/хв	350-750

Розрахунок процесу газообміну складається з визначення тиску газів у кінці впуску p_a , коефіцієнта надлишкових газів γ_r , температури газів в кінці впуску T_a і коефіцієнта наповнення свіжим зарядом η_v .

Тиск у кінці впуску, МПа:

$$P_a = P_o - (\beta^2 + \xi_{en}) \cdot \frac{\omega_{шл}^2}{2} \rho_0 \cdot 10^{-6}, \quad (2.1)$$

де P_o – тиск навколишнього середовища, МПа;

$(\beta^2 + \xi_{en})$ – сумарний коефіцієнт, що враховує гасіння швидкості β і опір впускної системи ξ_{en} ;

ω_{en} – середня швидкість руху заряду у прохідному перерізі впускної системи, м/с;

ρ_0 – густина заряду за відомих атмосферних умов, кг/м³:

$$\rho_0 = \frac{P_o \cdot 10^6}{R_n \cdot T_o}, \quad (2.2)$$

де R_n – газова стала повітря, Дж/(кг·К);

T_o – температура навколишнього середовища, К.

Коефіцієнт надлишкових газів:

$$\gamma_r = \frac{T_o + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{P_r}{\varepsilon P_a - P_r}, \quad (2.3)$$

де ΔT – підвищення температури заряду у процесі впуску, К;

T_r – температура газів на випуску, К;

P_r – тиск в кінці випуску, МПа;

ε – ступінь стиску;

P_a – тиск в кінці впуску, МПа.

Температура в кінці впуску, К:

$$T_a = \frac{T_o + \Delta T + \gamma_r \cdot T_r}{1 + \gamma_r}, \quad (2.4)$$

Коефіцієнт наповнення:

$$\eta_v = \frac{\varepsilon P_a}{P_o(\varepsilon - 1)} \cdot \frac{T_o}{T_o + \Delta T}, \quad (2.5)$$

Тиск у кінці стискання, МПа:

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1}, \quad (2.6)$$

де n_1 – показник політропи стискання.

Значення показника політропи стискання визначається з наступної формули:

$$n_1 = 1 + \frac{8,314}{20,16 + 1,788 \cdot 10^{-3} (\varepsilon^{k_1-1} + 1) \cdot T_a}, \quad (2.7)$$

де k_1 – показник адіабати, що визначається з номограми наведеної на рисунку 2.1.

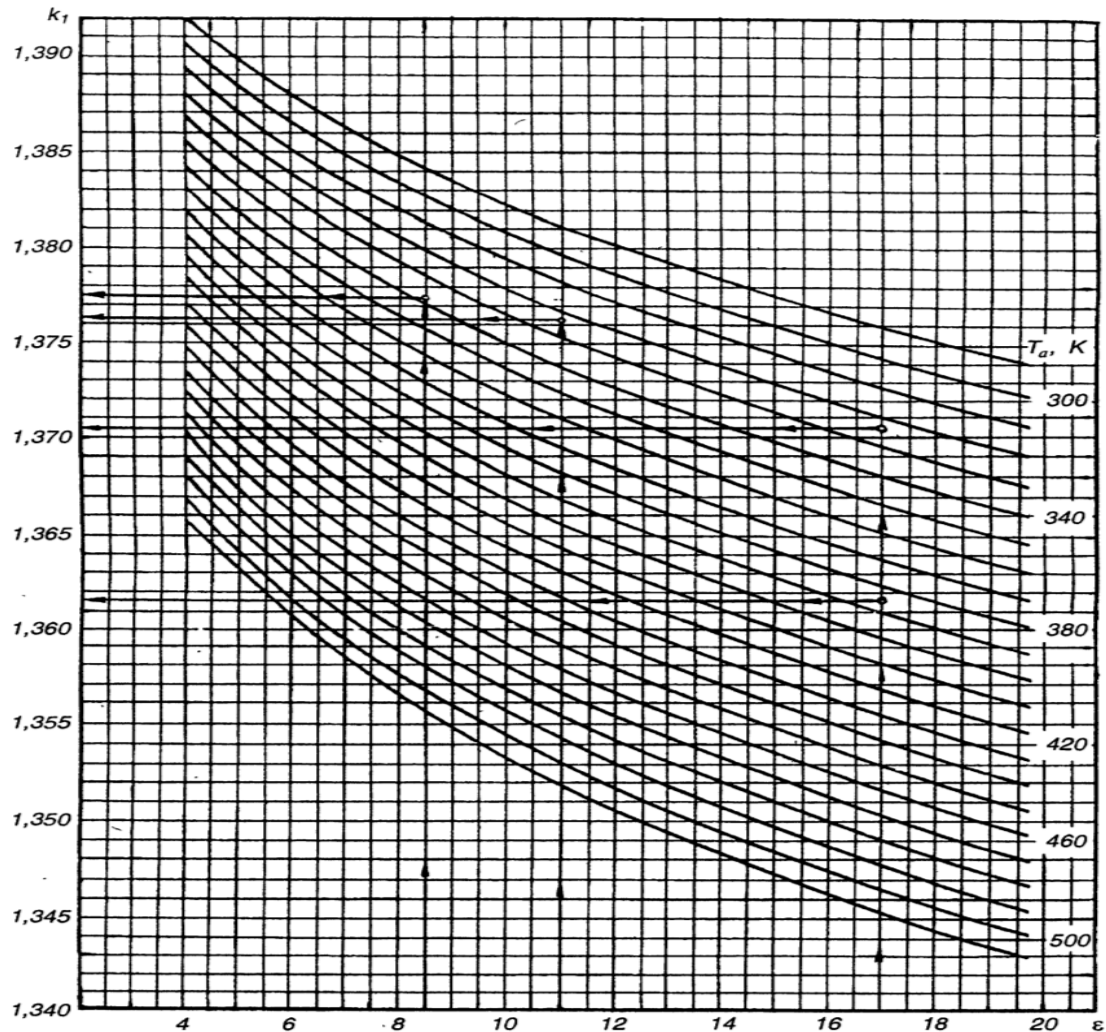


Рисунок 2.5 – Номограма для визначення показника адіабати стиснення k_1
Температура в кінці стискання, К:

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1-1}, \quad (2.8)$$

Теоретично необхідна кількість повітря для згорання палива, кмоль/кг:

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right), \quad (2.9)$$

де C , H та O – маса відповідно вуглецю, водню і кисню в 1 кг палива.

Кількість водяної пари в продуктах згоряння, кмоль/кг:

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2}, \quad (2.10)$$

Кількість молей азоту в продуктах згоряння, кмоль/кг:

$$M_{N_2} = 0,79 \cdot \alpha \cdot L_0, \quad (2.11)$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря.

Справжня кількість повітря і свіжого заряду, кмоль/кг:

$$M_1 = \alpha \cdot L_0, \quad (2.12)$$

Кількість кисню у продуктах згоряння, кмоль/кг:

$$M_{O_2} = 0,21 \cdot L_0 \cdot (\alpha - 1), \quad (2.13)$$

Кількість вуглекислого газу у продуктах згоряння кмоль/кг:

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12}, \quad (2.14)$$

Загальна кількість продуктів згоряння, кмоль/кг:

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{O_2} + M_{H_2O} + M_{N_2}, \quad (2.15)$$

Зміна кількості молей горючої суміші під час її згоряння:

$$\Delta M = M_2 - M_1, \quad (2.16)$$

Теоретичний коефіцієнт молекулярної зміни горючої суміші:

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1}, \quad (2.17)$$

Справжній коефіцієнт молекулярної зміни робочої суміші:

$$\mu = \frac{M_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r}, \quad (2.18)$$

Середня молярна теплоємність горючої суміші за сталого об'єму в кінці стиску, кДж/(кмоль·К):

$$mC_V = 20,038 + 2,554 \cdot 10^{-3} T_c, \quad (2.19)$$

Середня молярна теплоємність горючої суміші за сталого тиску, кДж/(кмоль·К):

$$mC_P = mC_V + 8,314, \quad (2.20)$$

Середня молярна теплоємність продуктів згоряння за сталого об'єму в кінці стиску, кДж/(кмоль × К):

$$mC_V'' = \frac{M_{CO_2} mC_{V_{CO_2}} + M_{CO} mC_{V_{CO}} + M_{H_2O} mC_{V_{H_2O}} + M_{N_2} mC_{V_{N_2}}}{M_2}, \quad (2.21)$$

де $M_{CO_2}, M_{CO}, M_{H_2O}, M_{N_2}$ – кількість молей відповідно вуглекислого газу, оксиду вуглецю, водяної пари та азоту у продуктах згоряння, кмоль/кг;

$mC_{V_{CO_2}}, mC_{V_{CO}}, mC_{V_{H_2O}}, mC_{V_{N_2}}$ – середня молярна теплоємність відповідно вуглекислого газу, оксиду вуглецю, водяної пари та азоту у продуктах згоряння, кДж/(кмоль·К).

Кількість теплоти, втраченої внаслідок неповного згоряння 1 кг палива, кДж/кг:

$$\Delta H_{II} = 119 \cdot 10^3 \cdot (1 - \alpha) L_0, \quad (2.22)$$

Підставляємо отримані вирази mC_V'' та ΔH_{II} до рівняння, К:

$$\frac{\xi \cdot (H_{II} - \Delta H_{II})}{M_1 \cdot (1 + \gamma_r)} + mC_V T_c = \mu \cdot mC_V'' \cdot T_z, \quad (2.23)$$

де ξ – коефіцієнт використання теплоти;

H_{II} – нижча теплота згоряння кДж/кг.

Розв'язуємо здобуте квадратне рівняння і визначаємо температуру газів в кінці згоряння як додатне значення кореня квадратного рівняння.

Підставивши здобуте значення температури газів у кінці згоряння до (2.21), дістаємо значення середньої молярної теплоємності і продуктів у кінці згоряння за сталого об'єму mC_V'' .

Тиск газів у кінці згоряння, МПа:

$$P_z = \mu \cdot P_c \cdot \frac{T_z}{T_c}, \quad (2.24)$$

Ступінь підвищення тиску під час згоряння:

$$\lambda = \frac{P_z}{P_c}, \quad (2.25)$$

Під час розрахунку процесу розширення визначають ступінь наступного розширення δ , тиск газів P_n та їх температуру T_n в кінці розширення.

Ступінь наступного розширення

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho}, \quad (2.26)$$

Тиск газів у кінці розширення, МПа:

$$P_n = \frac{P_z}{\delta^{n_2}}, \quad (2.27)$$

де n – показник політропи розширення.

Значення показника політропи розширення визначається з наступної формули:

$$n_1 = 1 + \frac{8,314}{23,7 + 0,0046 \cdot T_z \cdot \left(1 - \frac{1}{\delta^{k_2-1}}\right) \cdot T_a}, \quad (2.28)$$

де k_2 – показник адіабати розширення, який визначається з номограми наведеної на рисунку 2.2.

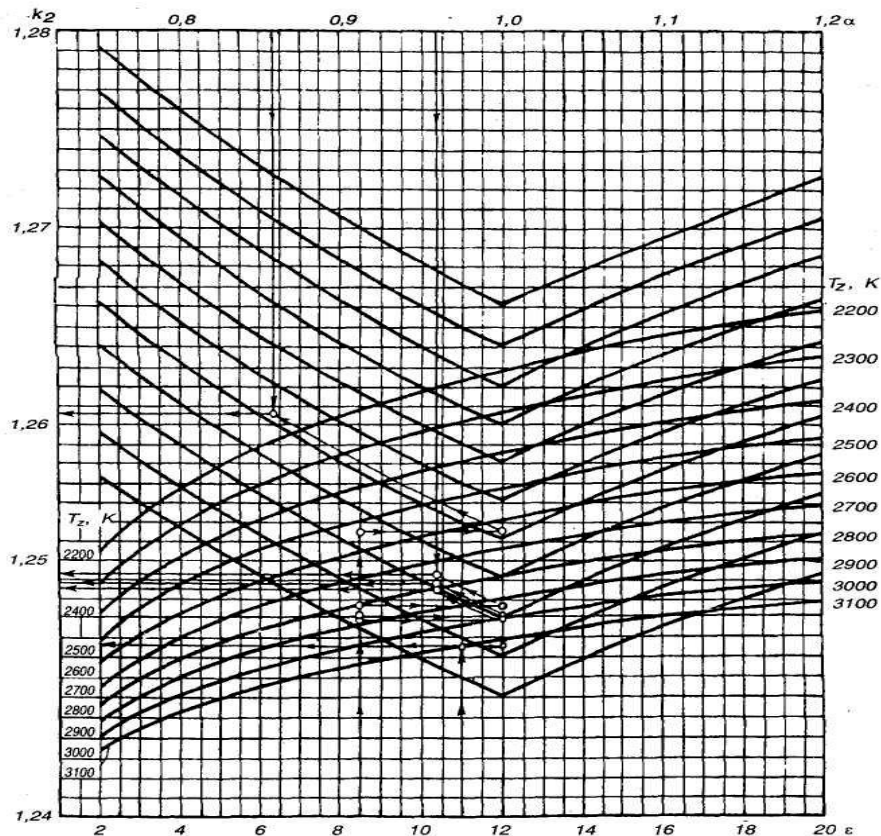


Рисунок 2.6 – Номограма для визначення показника адіабати розширення k_2

Температура газів у кінці розширення, К:

$$T_n = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}}, \quad (2.29)$$

Під час розрахунку параметрів, що характеризують цикл і роботу ДВЗ визначають середній індикаторний тиск розрахункового P'_i і справжнього P_i циклів, індикаторні ККД η_i і питому витрату палива g_i , ефективні ККД η_e і питому витрату палива g_e , середній ефективний тиск P_e .

Середній індикаторний тиск розрахункового циклу двигуна, МПа:

$$P'_i = \frac{P_c}{\varepsilon - 1} \cdot \left[\lambda \cdot (\rho - 1) + \frac{\lambda \cdot \rho}{n_2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right]. \quad (2.30)$$

Середній індикаторний тиск справжнього циклу двигуна, МПа:

$$P_i = \varphi \cdot P'_i - \Delta P_i, \quad (2.31)$$

де φ – коефіцієнт скруглення індикаторної діаграми;

ΔP_i – насосні втрати у чотиритактних двигунах.

Індикаторний ККД:

$$\eta_i = 8,314 \cdot \frac{M_1 \cdot T_0 \cdot P_i}{H_u \cdot P_0 \cdot \eta_V}, \quad (2.32)$$

Індикаторна питома витрата палива, г/(кВт·год):

$$g_i = \frac{3600 \cdot 10^3}{H_u \cdot \eta_i}, \quad (2.33)$$

Середній ефективний тиск газів, МПа:

$$P_i = \eta \cdot P'_i, \quad (2.34)$$

де η – механічний ККД.

Ефективний ККД:

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_M, \quad (2.35)$$

Ефективна питома витрата палива, г/(кВт·год):

$$g_e = \frac{3600 \cdot 10^3}{H_u \cdot \eta_e}, \quad (2.36)$$

Індикаторну діаграму будують у вигляді залежності зміни тиску P у циліндрі двигуна від зміни об'ємів V під час переміщення поршня на підставі результатів, визначених у тепловому розрахунку.

За результатами розрахунку побудована індикаторна діаграма чотиритактного дизеля K6S310DR, що наведена на рисунку 2.7.

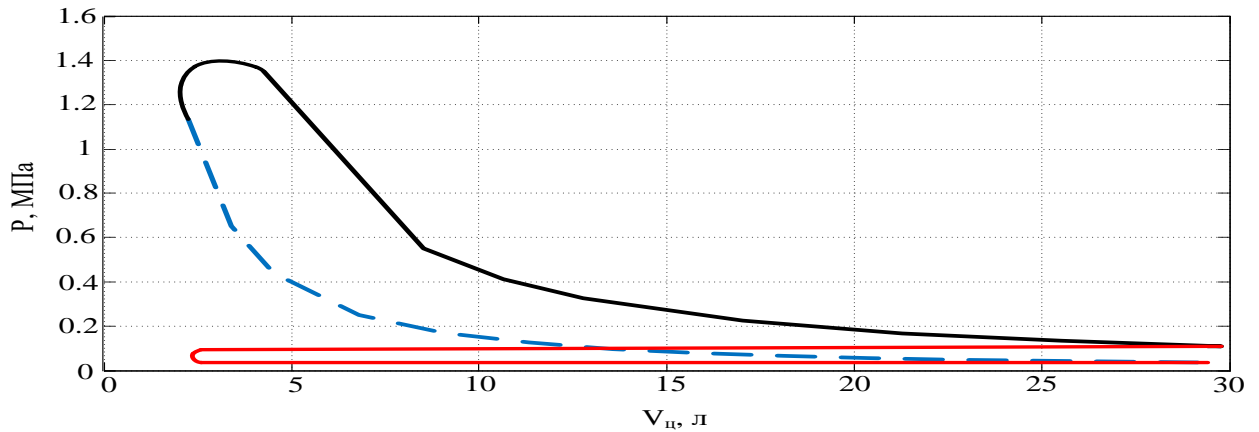


Рисунок 2.7 – Індикаторна діаграма роботи дизеля K6S310DR

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. Діаграма залежності сили, що діє на поршень від переміщення наведена на рисунку 2.8.

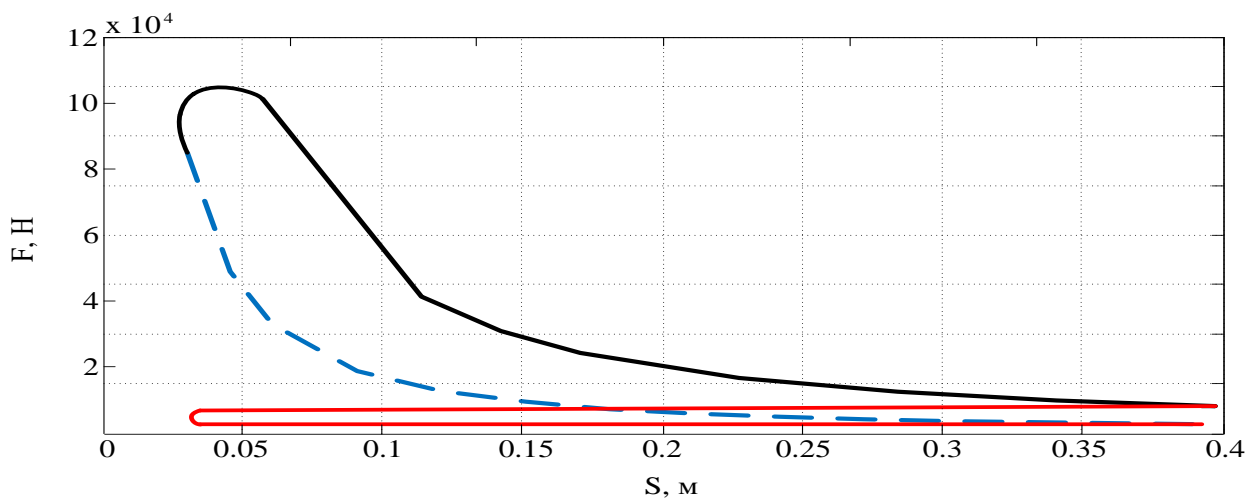


Рисунок 2.8 – Діаграма роботи дизеля K6S310DR

Отримані у результаті розрахунку значення для побудови індикаторної діаграми необхідно апроксимувати неперервними функціями для подальшого їх використання у створенні імітаційної моделі.

Одним зі способів апроксимації даних є інтерполяція. Задача інтерполяції полягає у наступному: задані точки (x_i, y_i) , $i = \overline{1, n}$, необхідно знайти функцію $\varphi(x)$, яка проходить через ці точки, тобто

$$\varphi(x_i) = y_i, i = \overline{1, n}. \quad (2.40)$$

Точки (x_i, y_i) мають назву вузли інтерполяції, а функція $\varphi(x)$ – інтерполуюча функція або інтерполятор. На практиці в якості інтерполуючої функції $\varphi(x)$ найчастіше використовуються алгебраїчні поліноми різного виду, при цьому інтерполяція має назву поліноміальної.

Інтерполуюча функція має вигляд:

$$\varphi(x) = \varphi(\vec{C}, x) = C_0\varphi_0(x) + C_1\varphi_1(x) + \dots + C_m\varphi_m(x) = \sum_{k=0}^m C_k\varphi_k(x), \quad (2.41)$$

де $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)$ – базисні функції.

Використовуючи умову (2.40) та вираз (2.41), отримуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} \varphi(\vec{C}, x_0) = C_0\varphi_0(x_0) + C_1\varphi_1(x_0) + \dots + C_m\varphi_m(x_0) = y_0 \\ \varphi(\vec{C}, x_1) = C_0\varphi_0(x_1) + C_1\varphi_1(x_1) + \dots + C_m\varphi_m(x_1) = y_1 \\ \dots \\ \varphi(\vec{C}, x_n) = C_0\varphi_0(x_n) + C_1\varphi_1(x_n) + \dots + C_m\varphi_m(x_n) = y_n \end{cases} \quad (2.42)$$

Єдине рішення системи (2.42) існує при двох умовах:

- кількість точок (x_i, y_i) , $i = \overline{1, n}$ дорівнює кількості коефіцієнтів C_k , $k = \overline{0, m}$;
- система рівнянь (3) повинна бути не виродженою, тобто визначник системи $\Delta \neq 0$.

Таким чином, якщо виконуються вищезазначені умови, то через точки (x_i, y_i) , проходить єдина функція $\varphi(x) = \sum_{k=0}^m C_k\varphi_k(x)$.

У випадку лінійної поліноміальної інтерполяції базисні функції мають наступний вигляд: $\varphi_0(x) = x^0 = 1$, $\varphi_1(x) = x^1 = x$, $\varphi_2(x) = x^2$, ..., $\varphi_m(x) = x^m$.

Інтерполююча функція при цьому має вигляд полінома ступеню m :
 $\varphi(x) = P_m(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_mx^m$ і, як наслідок, система (2.42) має вигляд

$$\begin{cases} C_0 + C_1x_0 + C_2x_0^2 + \dots + C_nx_0^n = y_0 \\ C_0 + C_1x_1 + C_2x_1^2 + \dots + C_nx_1^n = y_1 \\ \dots \\ C_0 + C_1x_n + C_2x_n^2 + \dots + C_nx_n^n = y_n \end{cases} \quad (2.43)$$

У матричній формі систему (2.43) можна переписати, як

$$A \times C = B, \quad (2.44)$$

де $A = \begin{bmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 & \dots & x_0^n \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^n \end{bmatrix}$ – матриця Ван дер Монда;

$$B = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \dots \\ C_n \end{bmatrix}.$$

Рішенням системи (2.44) буде вектор коефіцієнтів полінома C . Через те, що визначник матриці Ван дер Монда завжди відрізняється від нуля, то рішення системи єдине. Для рішення системи (2.44) необхідно знайти зворотню матрицю A . У цьому випадку рішенням буде $C = A^{-1} \times B$.

Таким чином, через задані на інтервалі $[a, b]$ точки $(x_i, y_i), i = \overline{0, n}$ завжди можна знайти єдиний інтерполяційний поліном $\varphi(x) = P_n(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_nx^n$, коефіцієнти якого є рішеннями системи (2.44).

Вираз (2.40) визначає поведінку функції $\varphi(x)$ тільки у вузлах інтерполяції $(x_i, y_i), i = \overline{0, n}$. Між вузлами $\varphi(x)$ може вести себе довільним чином, скільки завгодно далеко відхиляючись від залежності $f(x)$. Визначити похибку наближення можна використовуючи вираз для абсолютної похибки $\varepsilon = |f(x) - \varphi(x)|$.

Кращий спосіб перевірити якість інтерполяції – обчислити значення інтерполюючої функції в великому числі точок і побудувати графік. Однак в деяких ситуаціях якість інтерполянта можна проаналізувати. Припустимо, що величина y_i є точні значення відомої функції $f(x)$ в точках x_i . Нехай $P_n(x)$ – єдиний поліном n -го ступеня, що інтерполює функцію по цим точкам $(x_i, y_i), i = \overline{0, n}$. Припустимо, що у всіх точках $x \in [a, b]$ функція $f(x)$ має $(n+1)$ безперервну похідну. Тоді можна показати, що абсолютна помилка інтерполяції $\varepsilon(x) = |f(x) - P_n(x)|$ визначається виразом

$$\varepsilon(x) \leq \frac{|(x - x_0)(x - x_1)\dots(x - x_n)|}{(n+1)!} M_{n+1} \quad (2.45)$$

де $M_{n+1} = \max |f^{(n+1)}(x)|$ – максимальне значення $(n+1)$ -ї похідної функції $f(x)$ на інтервалі $[a, b]$.

Описаний вище математичний апарат включений до додатку Curve Fitting Tool середовища Matlab, у якому і проводилась апроксимація результатів та розрахунок похибки.

На рисунках 2.9 та 2.10 наведені результати апроксимації сили стиснення та сили при робочому ході поршня.

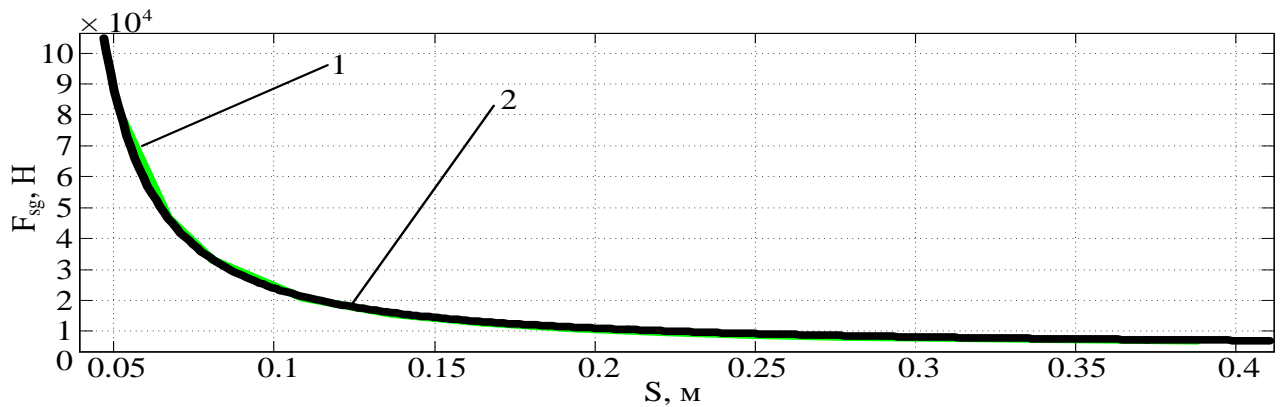


Рисунок 2.9 – Крива зміни сили стиснення: 1 – для розрахованих значень; 2 – для значень за поліномом.

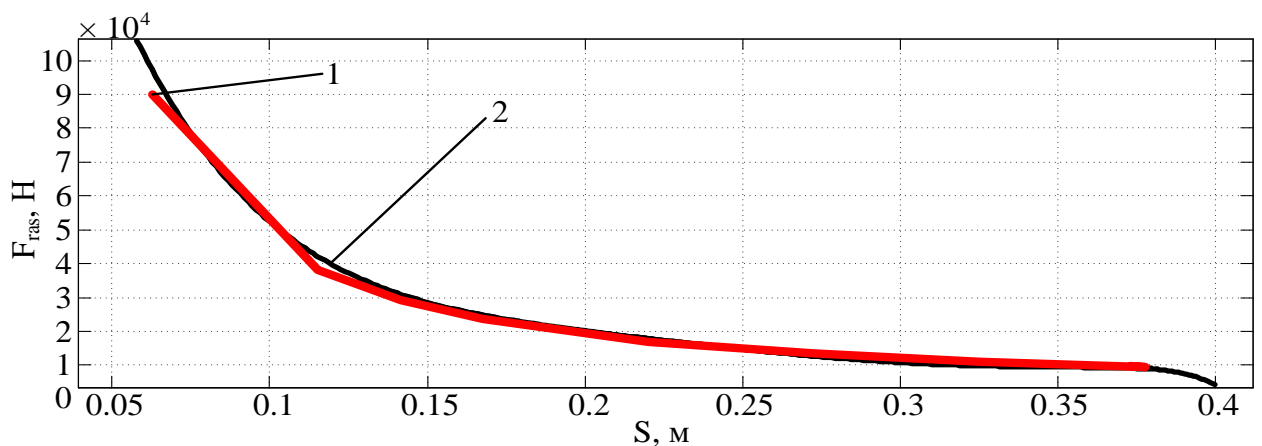


Рисунок 2.10 – Крива зміни сили при робочому ході поршня: 1 – для розрахованих значень; 2 – для значень за поліномом.

Для моделювання дизелю необхідно знати сумарну силу, що реалізується, в залежності від кута повороту колінчастого валу [23]. Поперечні осі кривошипів, що утворені шатунними шийками та щоками, розташовані у трьох площинах під кутом 120° між ними, через це сумарна сила буде дорівнювати сумі сил, що реалізуються кожним поршнем, зі зсувом на кут 120° . Сила, що реалізується поршнем при робочому ході, є позитивною, сила стискання, всмоктування та викиду газів є негативними, тому сумарна сила має форму, що наведена на рисунку 2.11.

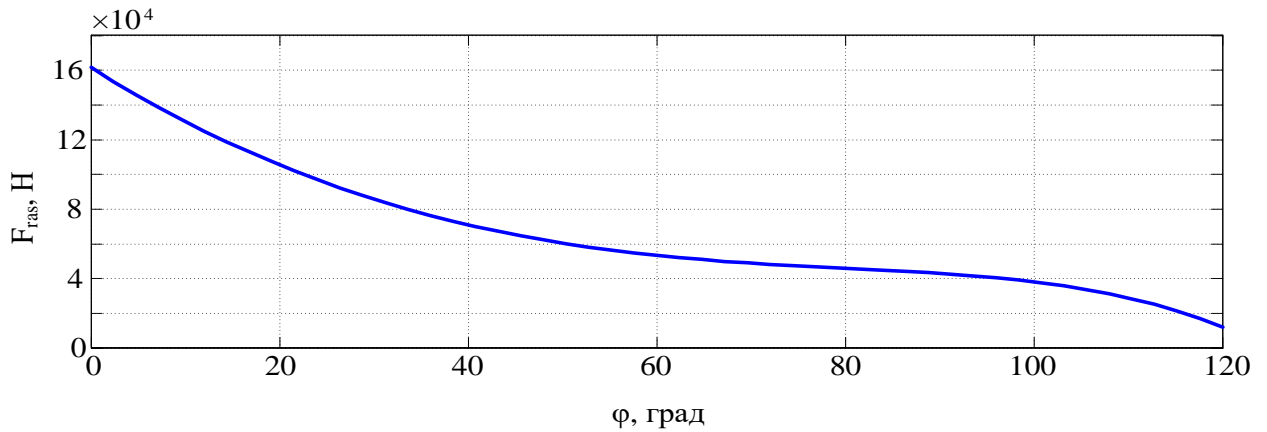


Рисунок 2.11 – Залежність сили, що реалізується дизелем від кута повороту колінчастого валу

На основі визначеної вище залежності сили дизелю від кута повороту колінчастого валу розроблена імітаційна модель роботи дизелю, що наведена на рисунку 2.12.

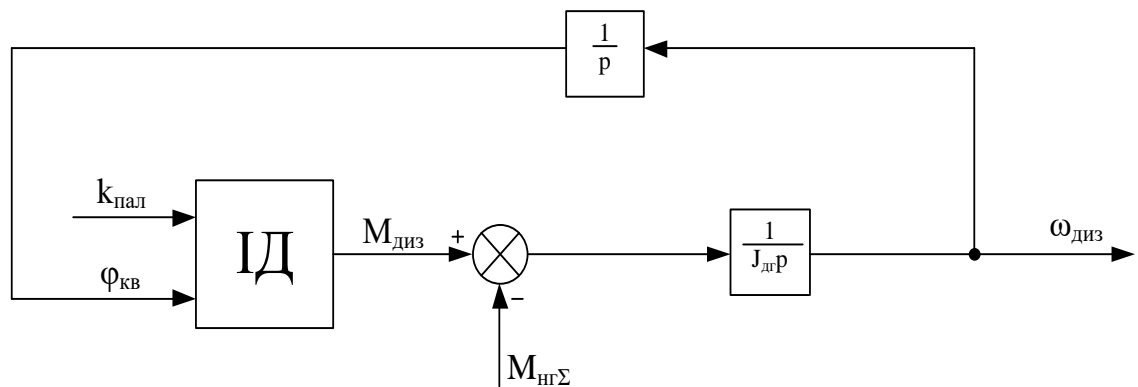


Рисунок 2.12 – Структурна схема імітаційної моделі роботи дизеля K6S310DR

Блок ІД, в залежності від кута повороту колінчастого валу та кількості палива, що розрахована РКО, визначає силу, яка реалізується дизелем. Отримане значення сили перетворюється у обертовий момент на валу дизеля, що передається до генератору.

2.5 Імітаційна модель генератора зі збуджувачем

На тепловозі встановлений генератор, що є десятиполюсною машиною постійного струму з незалежним збудженням. Живлення незалежної обмотки збудження генератора здійснюється від збуджувача – машини постійного струму, що об'єднана валом із допоміжним генератором [24]. На рисунку

2.13 наведена структурна схема імітаційної моделі роботи генератора зі збуджувачем.

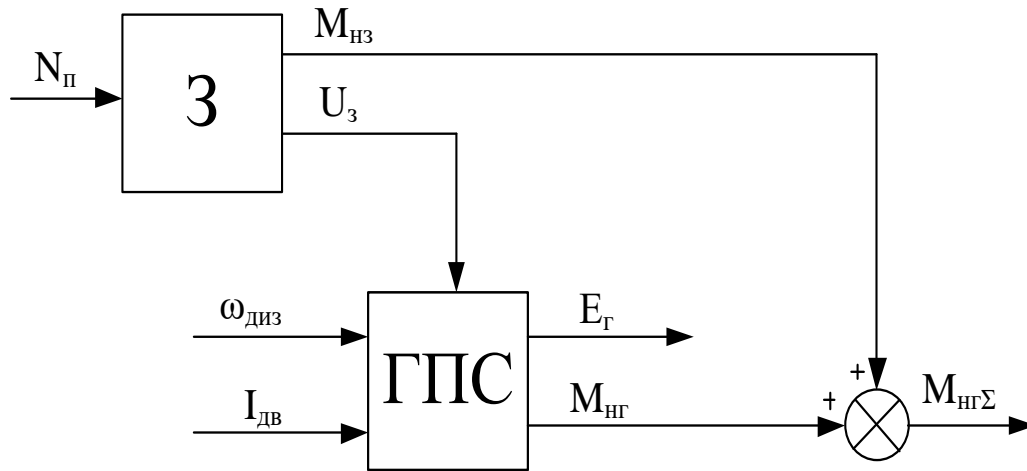


Рисунок 2.13 – Структурна схема імітаційної моделі роботи генератора постійного струму зі збуджувачем

У таблиці 2.1 наведені значення наруги на клеммах збуджувача в залежності від позиції контролера машиніста. Через необхідність підтримання постійного рівня вихідної напруги до блоку, що імітує збуджувач, заходить номер позиції контролера, який перетворюється у завдання вихідної напруги.

Тяговий генератор тепловоза забезпечує використання номінальної потужності дизеля тепловоза [25]. Дизель розвиває таку потужність, яку вимагає від нього генератор. Якщо генератор з якихось причин буде розвивати невелику потужність, то регулятор двигуна, підтримуючи постійною частоту обертання колінчастого вала, за допомогою рейок паливних насосів зменшить подачу палива в циліндри. Дизель буде недовантажений. Тепловоз зовсім не зможе вести поїзд, або поведе його із зниженою швидкістю. Отже, характеристика тягового генератора значною мірою визначає тягові якості локомотива.

Тепловоз з поїздом рухається по різному за профілем шляху. У процесі руху на підйомі швидкість поїзда зазвичай зменшується, на ухилі або рівному профілю після підйому – збільшується. При цьому швидкість може змінюватися в кілька разів. Зміна швидкості руху призводить до зміни в

широких межах режиму роботи та струму, споживаного тяговими електродвигунами від генератора. Отже, струм генератора при роботі дизеля на номінальній потужності буде значно змінюватися в залежності від швидкості руху локомотива. Для підтримання сталості потужності тягового генератора в разі зміни струму необхідно обернено пропорційно змінювати напругу генератора [23, 25].

Однак струм і напруга тягового генератора можуть змінюватися лише в певних межах. Максимальна напруга генератора не може бути перевищена за умовами магнітного насичення системи збудження, міцності ізоляції електричної машини, напруги між колекторними пластинами. Струм генератора також обмежений певним граничним значенням. У разі подальшого збільшення струму станеться перегрів обмотки якоря, колектора, почнеться іскріння під щітками, генератор може вийти з ладу.

Зобразимо необхідну зовнішню характеристику тягового генератора, тобто залежність його напруги від струму представлено на рисунку 2.14.

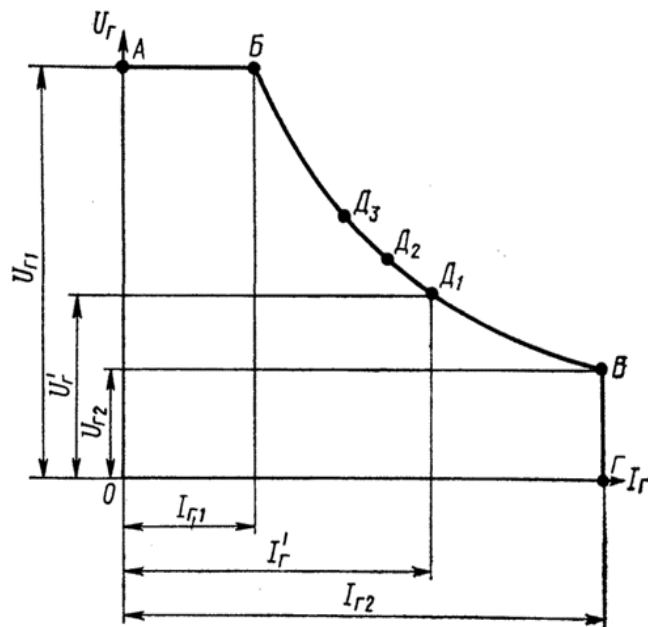


Рисунок 2.14 – Зовнішня характеристика тягового генератора

Необхідна зовнішня характеристика тягового генератора може бути представлена кривою АБВГ. Основною робочою частиною характеристики є ділянка БВ, на якій напруга тягового генератора змінюється обернено

пропорційно току генератора і його потужність зберігається постійною. Після того як струм зменшився до величини $I_{Г1}$ (точка Б характеристики), а напруга зросла до гранично допустимого значення $U_{Г1}$, подальшого зростання напруги із зменшенням струму не відбувається. Ділянка кривої АБ характеризує обмеження потужності генератора по напрузі. У разі коли струм досягає гранично допустимої величини, напруга генератора починає різко зменшуватися, попереджаючи подальше збільшення струму. Ділянка характеристики ВГ є обмеженням за величиною максимального струму генератора.

Для побудови структурної схеми генератора постійного струму незалежного збудження використано систему рівнянь, яка описує його поведінку:

$$\begin{cases} U_{ag} = E_g - L_{sg} \frac{dI_{ag}}{dt} + R_{sg} I_{ag} \\ U_{vg} = L_{vg} \frac{dI_{vg}}{dt} + R_{vg} I_{vg} \\ E_g = k_g \Phi_g \omega_{dis} \\ M_n = k_g \Phi_g I_{ag} \end{cases} \quad (2.46)$$

де U_{ag} – напруга живлення тягових двигунів, В;

U_{vg} – напруга живлення обмотки збудження генератора, В;

E_g – електрорушійна сила генератора, В;

I_{ag} – струм якірного кола генератора, А;

R_{sg} – загальний активний опір обмоток якірного кола генератора, Ом;

L_{sg} – загальна індуктивність всіх обмоток якірного кола генератора, Гн;

I_{vg} – струм кола збудження генератора, А;

R_{vg} – активний опір обмотки збудження генератора, Ом;

L_{vg} – індуктивність обмотки збудження генератора, Гн;

Φ_g – магнітний потік генератора, Вб;

ω_{dis} – кутова частота обертання якоря генератора, рад/с;

M_n – момент навантаження дизеля, Н·м;

k_g – електромеханічна постійна двигуна.

2.6 Імітаційна модель тягового приводу тепловозу

На тепловозі ЧМЕЗ встановлений тяговий ДПС послідовного збудження ТЕ-006, що був змодельований за методикою, яка описана у [26].

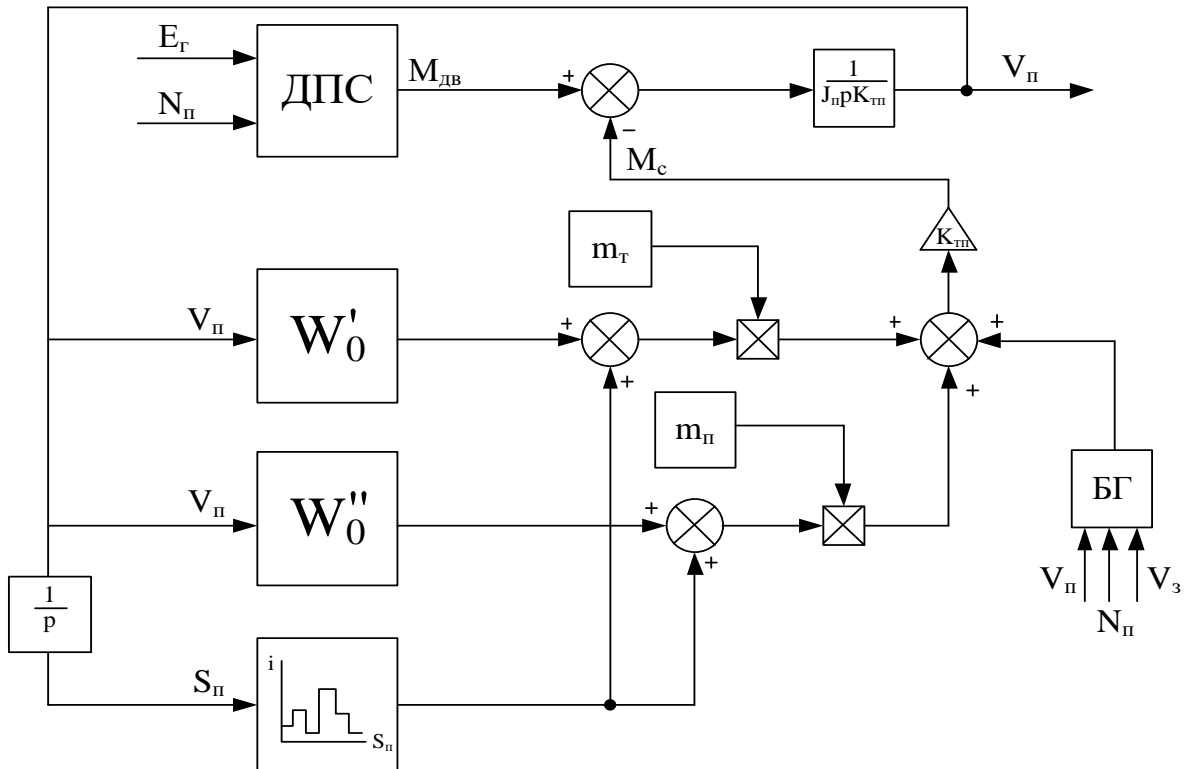


Рисунок 2.15 – Структурна схема імітаційної моделі тягового електроприводу тепловозу

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, що наведені у [27]. У якості профілю шляху використаний профіль ділянки Харків – Мерефа, що зображений на рисунку 2.16. Вхідним параметром для блоку вибору ухилу є шлях, що пройшов потяг, який отримується шляхом інтегрування швидкості руху поїзда.

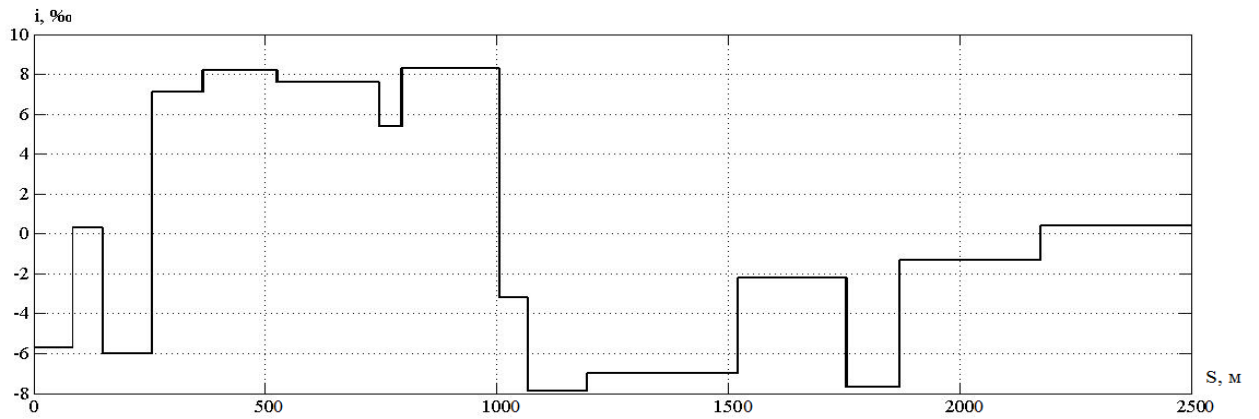


Рисунок 2.16 – Профіль шляху на ділянці Харків – Мерефа

Блок, що моделює гальмування поїзда, розраховує гальмівну силу за рівняннями, що наведені у [28]. Блок-схема алгоритму роботи блоку гальмування БК наведена на рисунку 2.17.

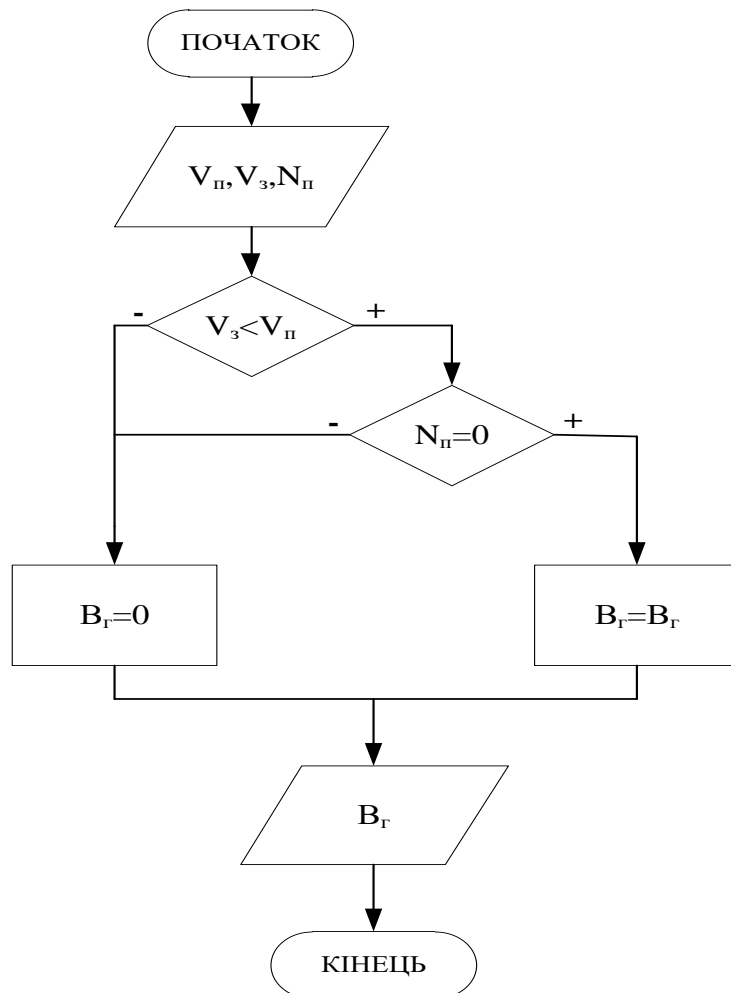


Рисунок 2.17 – Блок-схема алгоритму роботи блоку гальмування

Вхідними змінними для роботи блоку є задана швидкість V_3 , поточна швидкість потяга V_n та номер позиції контролера машиніста тепловоза N_n .

Для виключення режиму, при якому відбувається гальмування з працюючими тяговими двигунами, виконується перевірка поточного положення ручки контролера машиніста. Якщо положення ненульове, то гальмування не відбувається.

2.7 Результати імітаційного моделювання

Тестування роботи імітаційної моделі проводилось при параметрах, що наведені вище. При цьому 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 80км/год. З урахуванням цього існує можливість використовувати різні інтенсивності розгону потяга з подальшим утриманням середньої швидкості по перегону. На рисунку 2.18 представлені два види тахограм руху потяга.

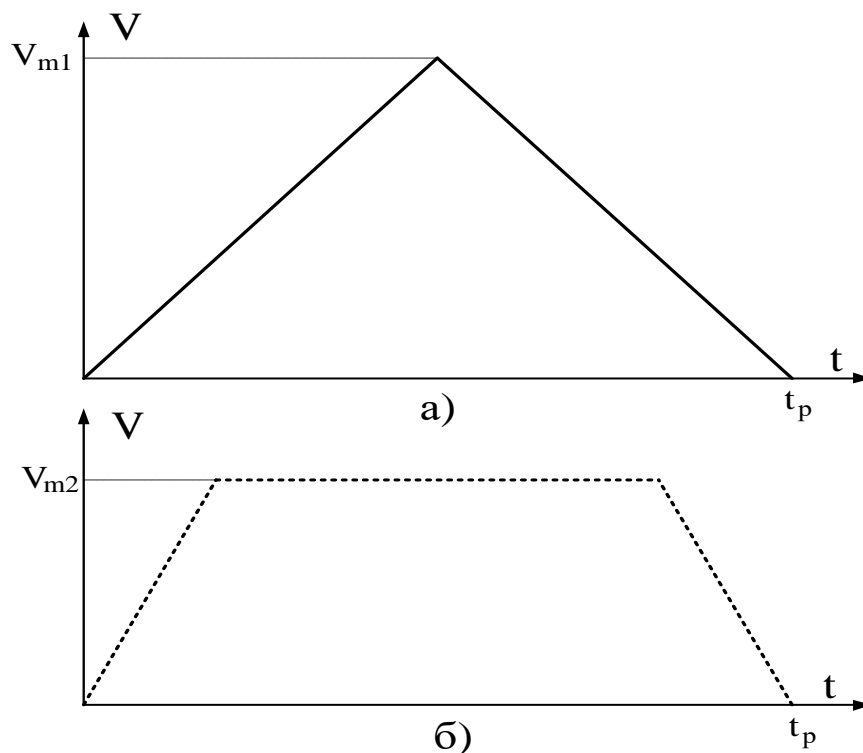


Рисунок 2.18 – Різновиди тахограм розгону поїзда

На показаних тахограмах t_p – це час руху по перегону, який для двох тахограм мають однакові значення. Зміна інтенсивності розгону потяга приводить до зміни максимальних швидкостей, що на приведених діаграмах представлені як V_{m1} , V_{m2} . В програмному комплексі Matlab за допомогою m-

файла була написана підпрограма, в якій проводився розрахунок інтенсивності розгону та гальмування потяга від заданої максимальної швидкості при умові дотримання часу руху по перегону. При дослідженні роботи потяга на імітаційній моделі задавались тахограми з максимальними швидкостями в інтервалі 40-80 км/год з кроком 10 км/год. На рисунках 2.19 – 2.23 показані осцилограми роботи маневрового тепловозу з 10 вагонами, при таких максимальних швидкостях.

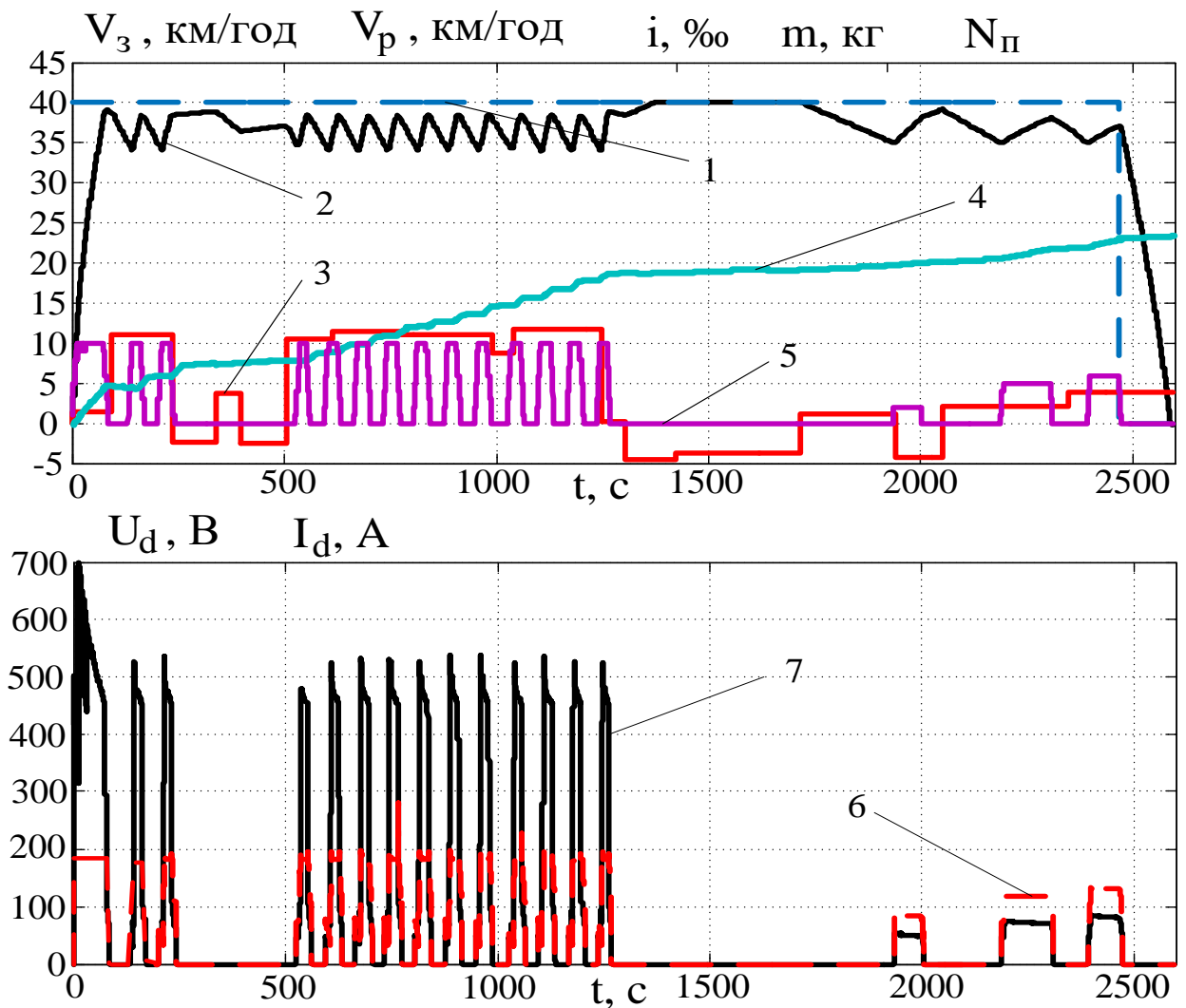


Рисунок 2.19 – Осцилограми роботи локомотива при максимальній швидкості 40 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – напруга на тяговому двигуні; 7 – струм тягового двигуна

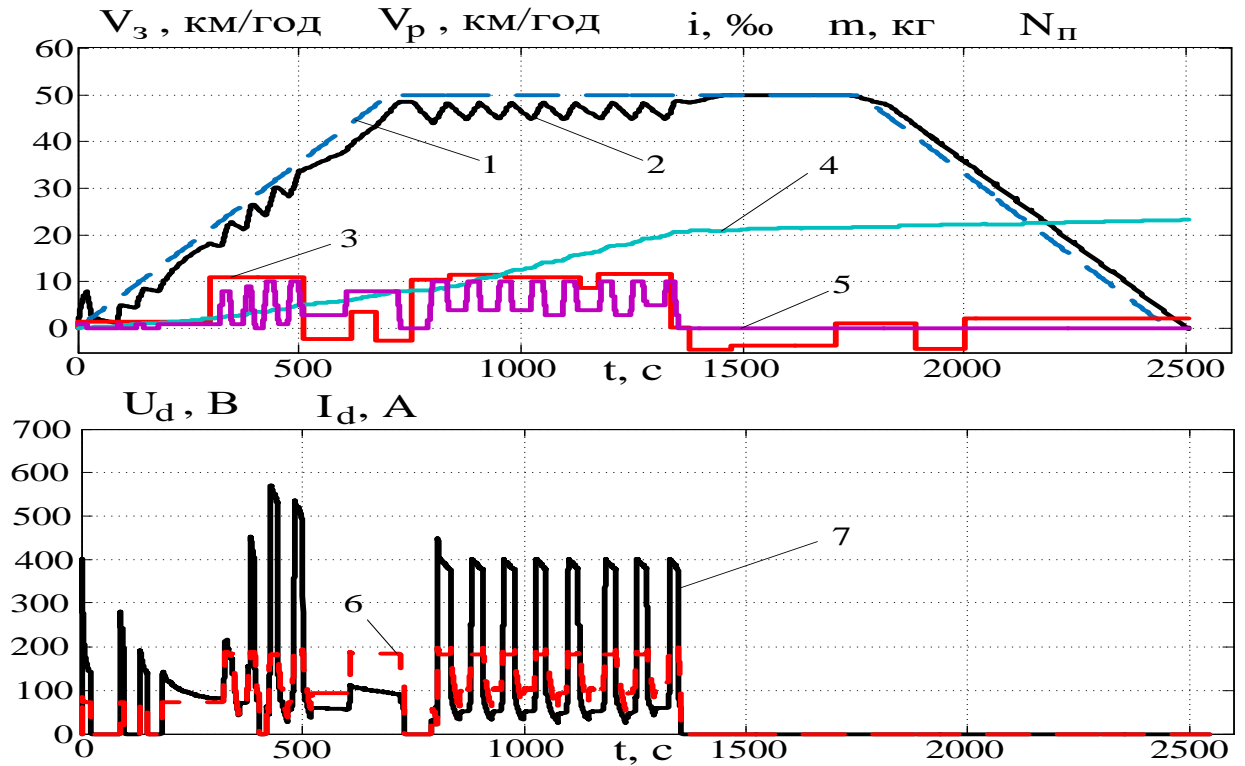


Рисунок 2.20 – Осцилограми роботи локомотива при максимальній швидкості 50 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – напруга на тяговому двигуні; 7 – струм тягового двигуна

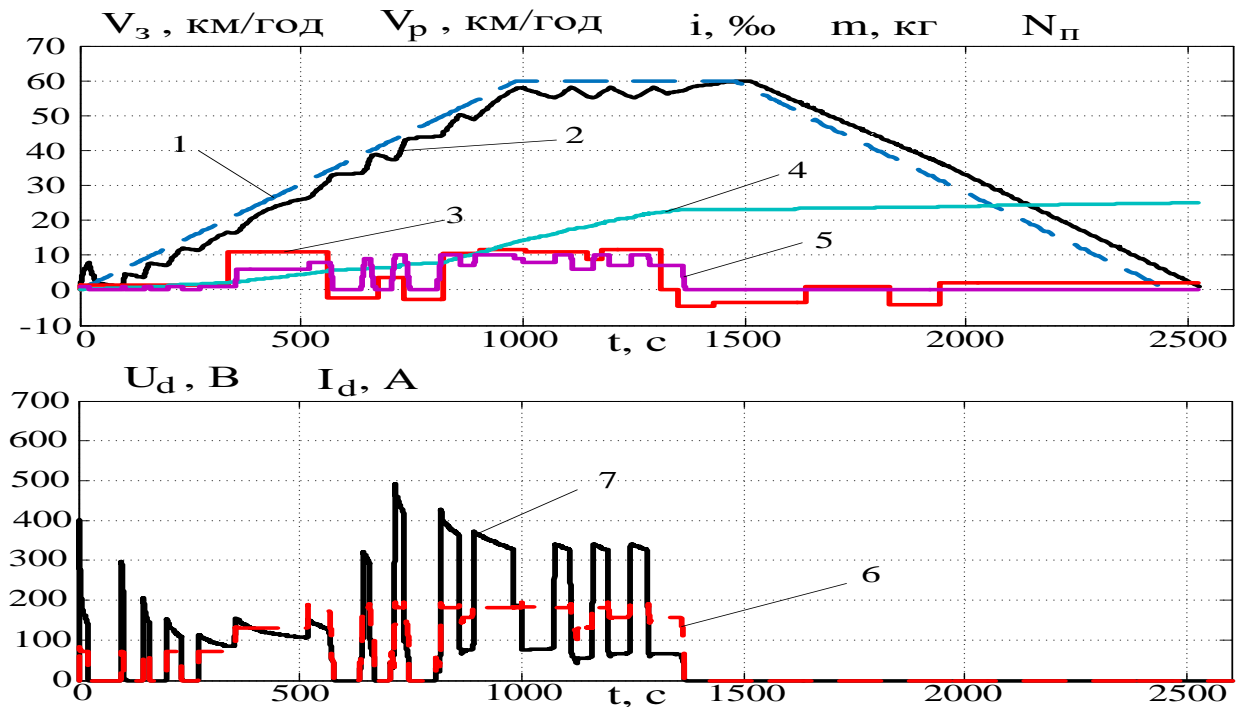


Рисунок 2.21 – Осцилограми роботи локомотива при максимальній швидкості 60 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – напруга на тяговому двигуні; 7 – струм тягового двигуна

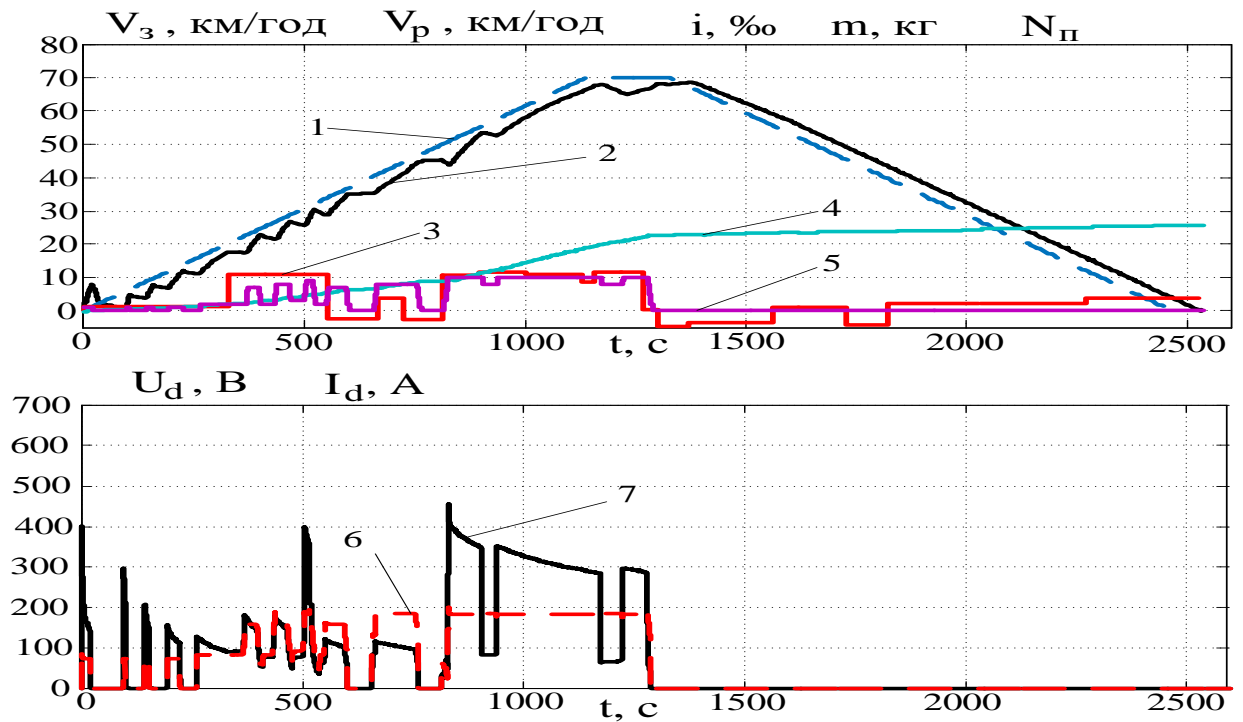


Рисунок 2.22 – Осцилограми роботи локомотива при максимальній швидкості 70 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – напруга на тяговому двигуні; 7 – струм тягового двигуна

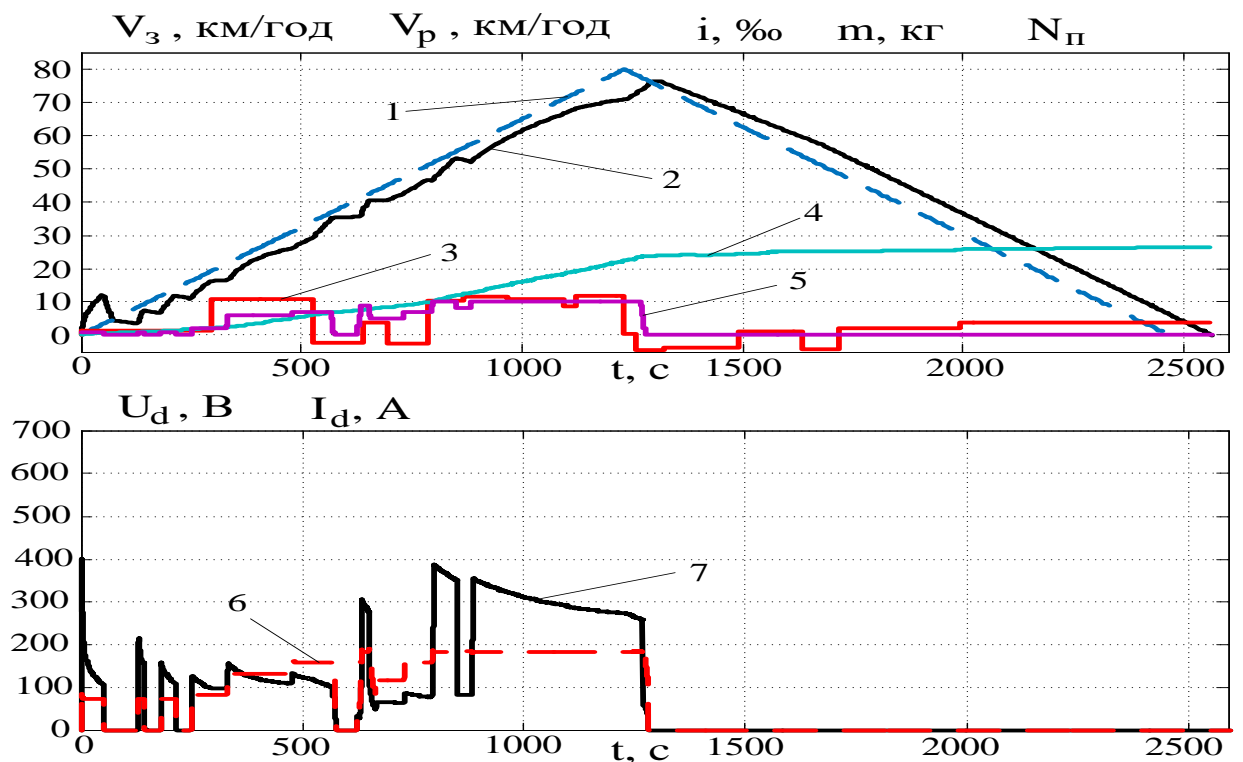


Рисунок 2.23 – Осцилограми роботи локомотива при максимальній швидкості 80 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – напруга на тяговому двигуні; 7 – струм тягового двигуна

На отриманих осцилограмах кривою 3 показано процес набору позицій, який змінюється при різних величинах максимальної швидкості. Кожній позиції відповідає зміна напруги на тягових двигунах (крива 6) та величини струму (крива 7) в них, яка обмежувалась на рівні 600 А. На графіках також просліджується тенденція зростання витрати палива при збільшенні максимальної швидкості, що потребує більш детального дослідження. Змінюючи максимальну швидкість трикутної діаграми (рис.2.18 а) в діапазоні 70-95 км/год з кроком 5 км/год були отримані результати, які представлені в табличному виді (таблиця 2.3) та у вигляді тривимірної поверхні (рис.2.24).

Таблиця 2.3 – Результати витрат палива

Максимальна швидкість трикутної тахограми, км/год	Максимальна швидкість руху потяга за тахограмою, км/год	Кількість витрат палива, кг
70	40	30,07
	50	30,96
	60	31,38
	70	31,14
75	40	30,05
	50	30,82
	60	31,69
	70	30,6
80	40	30,06
	50	30,79
	60	31,61
	70	31,87
	80	32,4
85	43	31,33
	50	30,35
	60	32,64
	70	33,18
	80	34,04
90	50	30,84
	60	34,04
	70	34,02
	80	35,25
95	50	32,59
	60	34,4
	70	35,72
	80	35,81

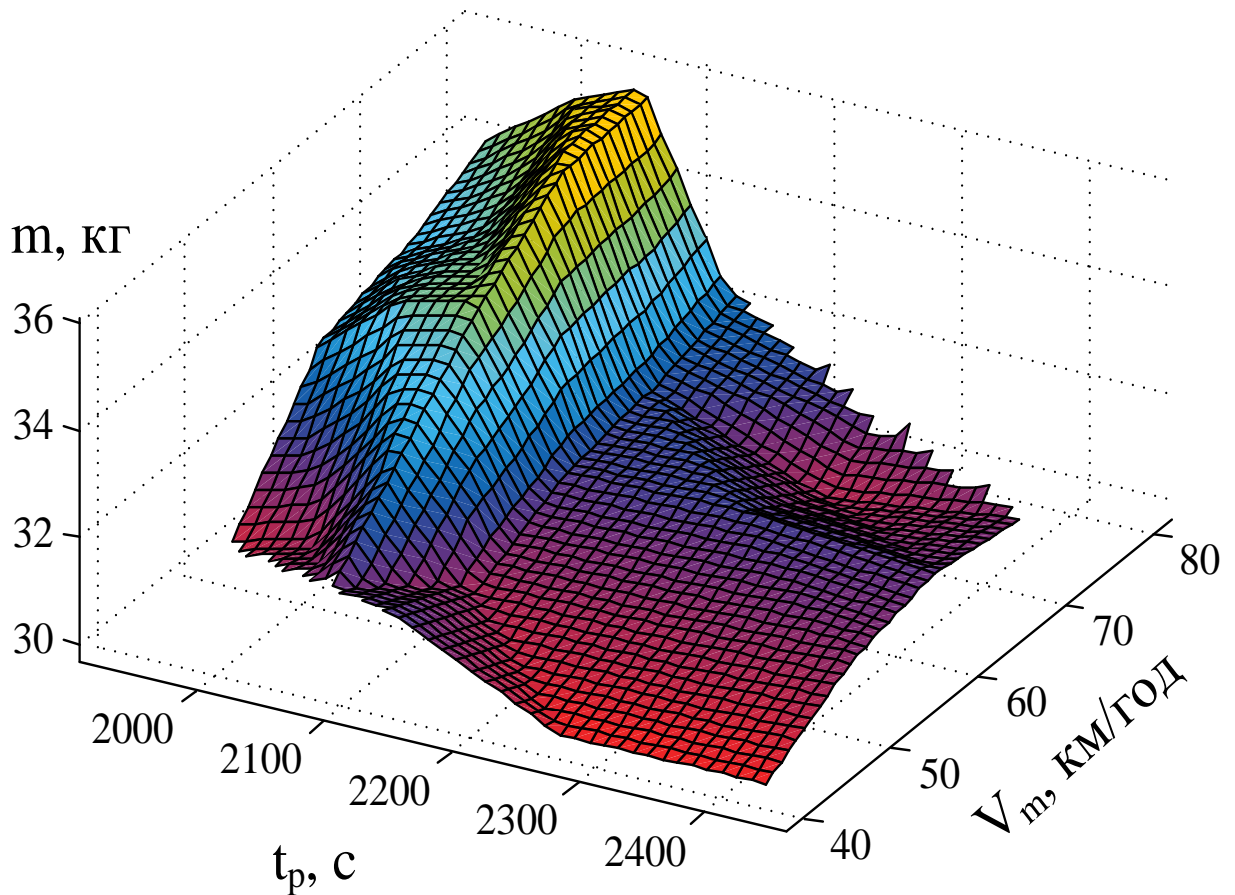


Рисунок 2.24 – Зміна витрат палива в залежності від максимальної швидкості та часу руху по перегону

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 (рис. 2.24) на рівні 40-50 км/год.

Також був досліджений принцип Понтрягіна [26, 27], який є оптимальним з точки зору швидкодії. Результати моделювання з використання тахограми по такому принципу представлені на рис.2.25.

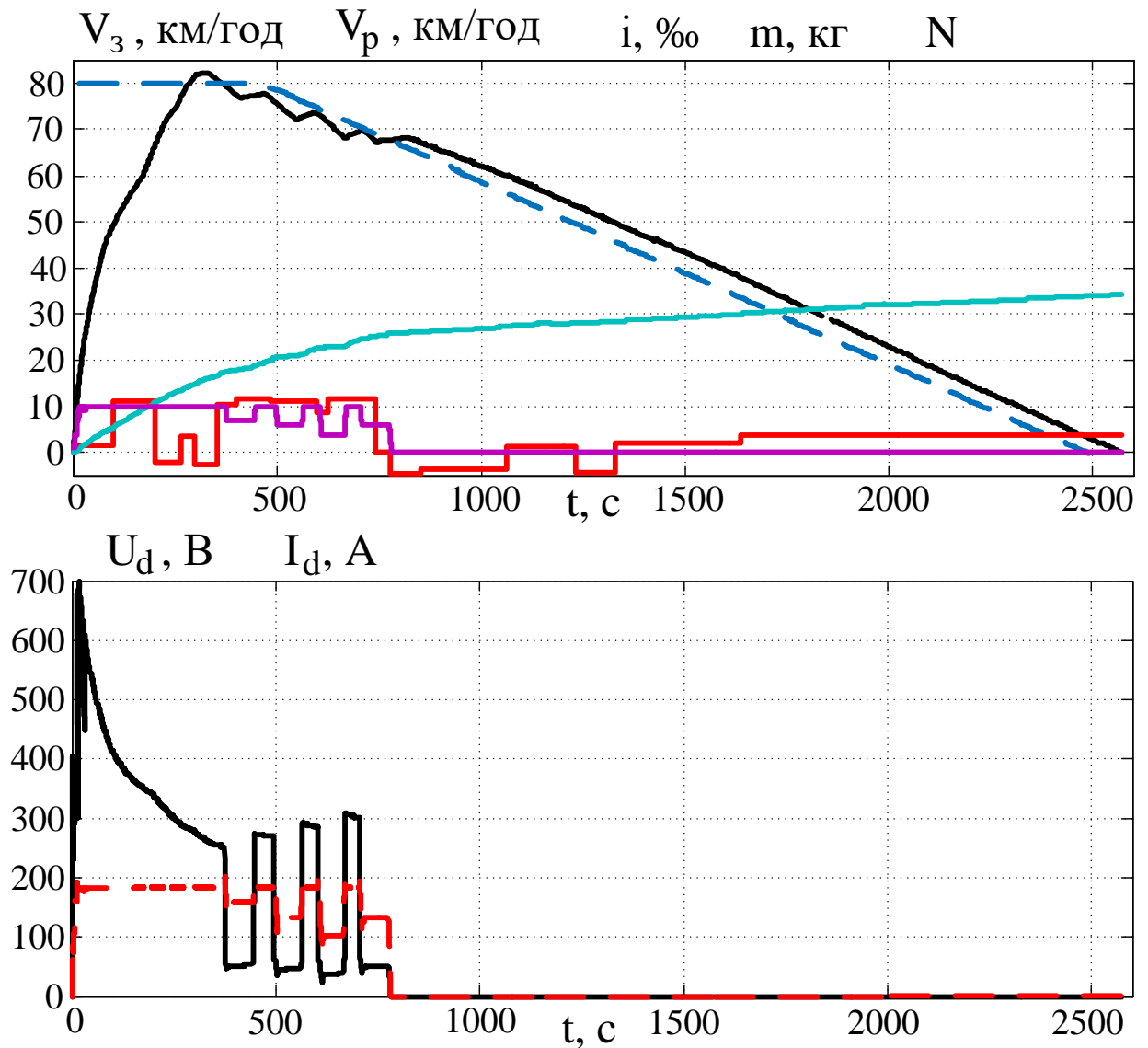


Рисунок 2.25 – Осцилограми роботи локомотива при максимальній швидкості 80 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – напруга на тяговому двигуні; 7 – струм тягового двигуна

Як показує отриманий результат, витрати палива складають **33,86 кг**, що не є найоптимальнішим режимом ведення поїзда з точки зору економічності.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Запропонована математична модель тепловозу ЧМЕЗ, а саме пульта керування, дизеля K6S310DR з регулятором кількості обертів колінчастого валу, тягового генератора TD-802 постійного струму незалежного збудження та тягового електричного приводу з ДПС послідовного збудження TE-006. Така математична модель дозволяє відображати роботу тепловоза на реальній ділянці шляху з імітацією ведення поїзда машиністом.

2. Розрахована індикаторна діаграма дизеля K6S310DR з подальшою апроксимацією результатів методом інтерполяції. Отримані неперервні залежності тиску та сили, що діють на поршень, в залежності від його переміщення, а в подальшому від кута повороту колінчастого валу в чотирьох режимах. Похибка апроксимації не перевищувала 3%. Сімейство індикаторних діаграм було застосоване для розробки імітаційної моделі дизеля.

3. Імітаційна модель генератора та ДПС розроблена на основі загальноприйнятої системи диференційних рівнянь.

4. На основі структурної схеми була розроблена імітаційна модель роботи тепловоза з використанням реального профілю шляху ділянки Харків–Мерефа, основних рівнянь руху потягу. Така модель дозволила отримати осцилограми роботи тепловоза при різних тахограмах руху поїзда, а саме: швидкість потяга, профіль шляху, витрати палива, номер позиції контролера машиніста, напруга на тяговому двигуні, струм тягового двигуна.

5. Встановлено, що найменші витрати палива, а саме 29-31 кг мають місце при встановленні максимальної швидкості на рівні 40-50 км/год.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ГІБРИДНОГО ТЕПЛОВОЗУ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРИВОДІВ

У третьому розділі проведені дослідження, що направлені на вивчення можливості застосування гібридної силової установки на маневровому тепловозі як із базовими ДПС, так і з тяговими вентиляно-індукторними двигунами (ВІД). Для цього було зроблено наступне:

- запропоновано функціональну схему гібридного локомотива;
- проведені розрахунки дизель-генераторної установки та побудована її імітаційна модель;
- розроблені функціональні схеми та імітаційні моделі накопичувачів енергії;
- ідентифіковані параметри ВІД та складена його імітаційна модель;
- розроблена імітаційна модель роботи гібридного тепловозу з можливим використанням в якості приводного ДПС або ВІД. Отримані результати моделювання та проведені їх аналіз.

При проведенні дослідження у якості вихідних даних взяті параметри наступних конструкційних складових тепловозу: дизель С18 ACERT, синхронний генератор ГС-500-400, акумулятор LT-LYP 770, конденсатор ИКЭ 40/96, тяговий ДПС послідовного збудження ТЕ-006 та ВІД ДВІ-165.

3.1 Вибір та обґрунтування функціональної схеми гібридного тепловоза

Огляд існуючих різновидів систем гібридного тягового приводу локомотивів показав, що в таких системах використовують різноманітні схеми і елементи. Виходячи з аналізу цих систем, пропонується наступна узагальнена функціональна схема гібридного маневрового тепловозу (рисунок 3.1).

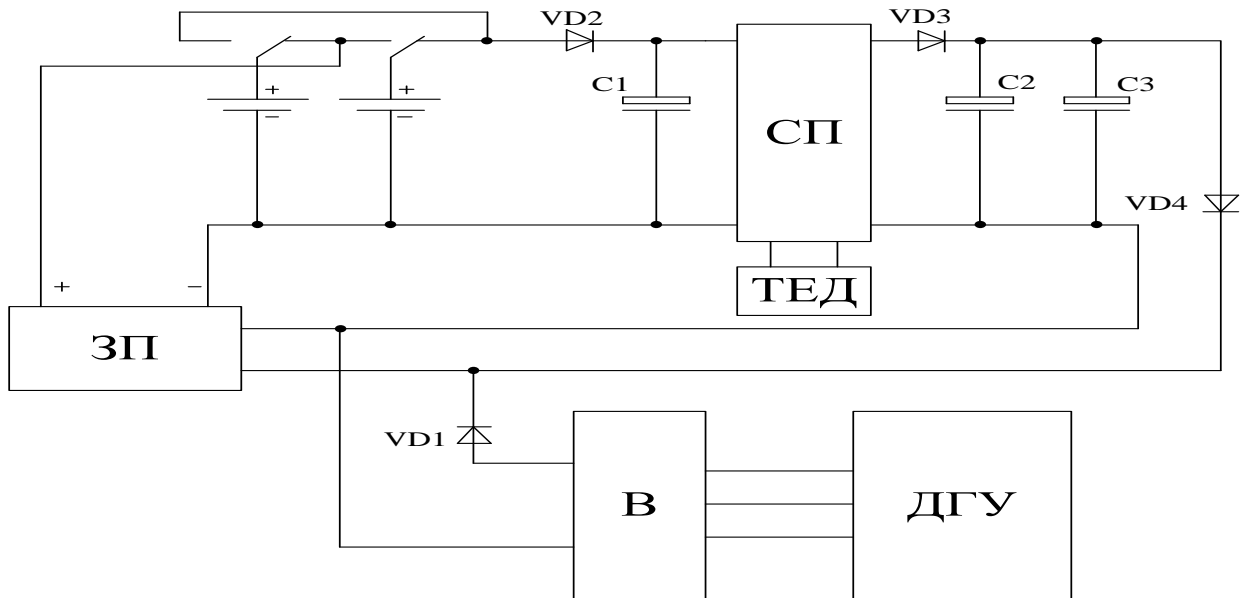


Рисунок 3.1 – Узагальнена функціональна схема гібридного маневрового тепловозу

Запропонована схема складається з дизель-генераторної установки ДГУ, випрямляча В, зарядного пристрою ЗП, статичного перетворювача СП, тягового двигуна ТЕД та двох накопичувачів енергії – акумуляторної та конденсаторної батарей. Дослідження роботи гібридного тепловоза пропонується виконувати з базовими ТЕД постійного струму та більш перспективними на сьогоднішній день – вентиляно-індукторними ТЕД.

Для аналізу режимів роботи гібридного тепловозу була складена розгорнута функціональна схема, що наведена на рисунку 3.2.

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. При виконанні умови (3.1), що відповідає алгоритму роботи блоку вибору позиції (рис. 2.3), ПК одночасно подає сигнал на роботу СП та Д.

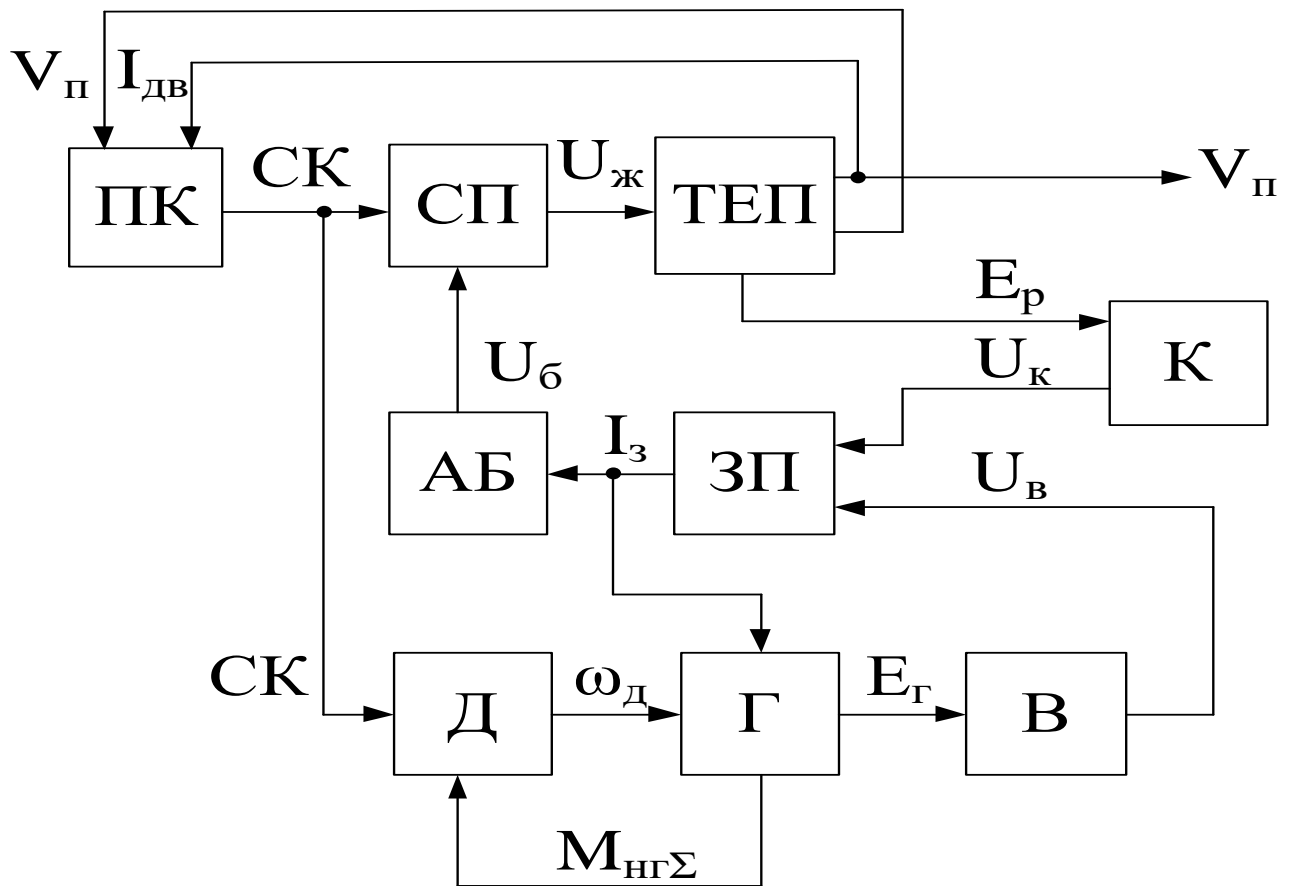


Рисунок 3.2 – Розгорнута функціональна схема гібридного тепловозу

$$N_p = \begin{cases} N_p - 1 & \text{if } I_m > I_n \vee V_t > V_s \\ N_p & \text{if } I_m < I_n \wedge V_s - 5 \leq V_t \leq V_s \\ N_p + 1 & \text{if } I_m < I_n \wedge V_t < V_s - 5 \end{cases}, \quad (3.1)$$

де N_p – номер позиції ПК;

I_m – величина струму тягового двигуна;

I_n – номінальний пусковий струм двигуна;

V_t – поточна швидкість руху поїзда;

V_s – задана швидкість за тахограмою.

СП живиться від АБ, заряд якої відбувається через ЗП, який, в свою чергу, може отримувати живлення як від К, так і від Г через В. К заряджається при режимі рекуперативного гальмування та віддає свою енергію при досягненні певного рівня напруги, що відповідає номінальному значенню для роботи ЗП. При низькому рівні напруги на К та розрядженій

АБ її живлення здійснюється від Д-Г. В якості ТЕП може виступати як привід постійного, так і змінного струмів.

Вхідними параметрами для блоку ПК є швидкість поїзда V_n та струм двигуна $I_{\delta\delta}$, 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 $U_{жс}$. СП, в свою чергу, отримує вхідну величину напруги U_6 від АБ. ТЕП може працювати як в тяговому режимі, так і в режимі рекуперації. Вихідними величинами блока ТЕП є швидкість поїзда V_n , струм двигуна $I_{\delta\delta}$ (в тяговому режимі) та Е.Р.С. E_p (в режимі рекуперації). В залежності від величин напруг U_k та U_6 ЗП видає величину струму заряду I_3 , який поступає в АБ та Г. Вхідними величинами блоку Г є значення швидкості дизеля $\omega_{диз}$ та струму I_3 , а вихідними – Е.Р.С. генератора E_2 та моменту навантаження $M_{н2\Sigma}$, яке є вхідною величиною для Д.

3.2 Математичне моделювання системи Г-Д

Проаналізувавши діаграму (рис. 1.18) було встановлено, що час використання локомотива на номінальну потужність складає 29% від загального добового часу експлуатації. Виконавши відповідні розрахунки, було визначено кількість енергії, що витрачається за добу експлуатації локомотива, яка складає 3,48 МВт·год. Виходячи з цього, сумарна добова кількість енергії, що виробляється дизель-генераторною установкою, повинна перевищувати загальнодобову затрачену кількість енергії. А тому в запропонованій системі (рис. 3.1) в якості прототипу застосований новий дизель виробництва фірми Caterpillar С18 ACERT, що зображений на рисунку 3.3, а його технічні характеристики приведені в таблиці 3.1.

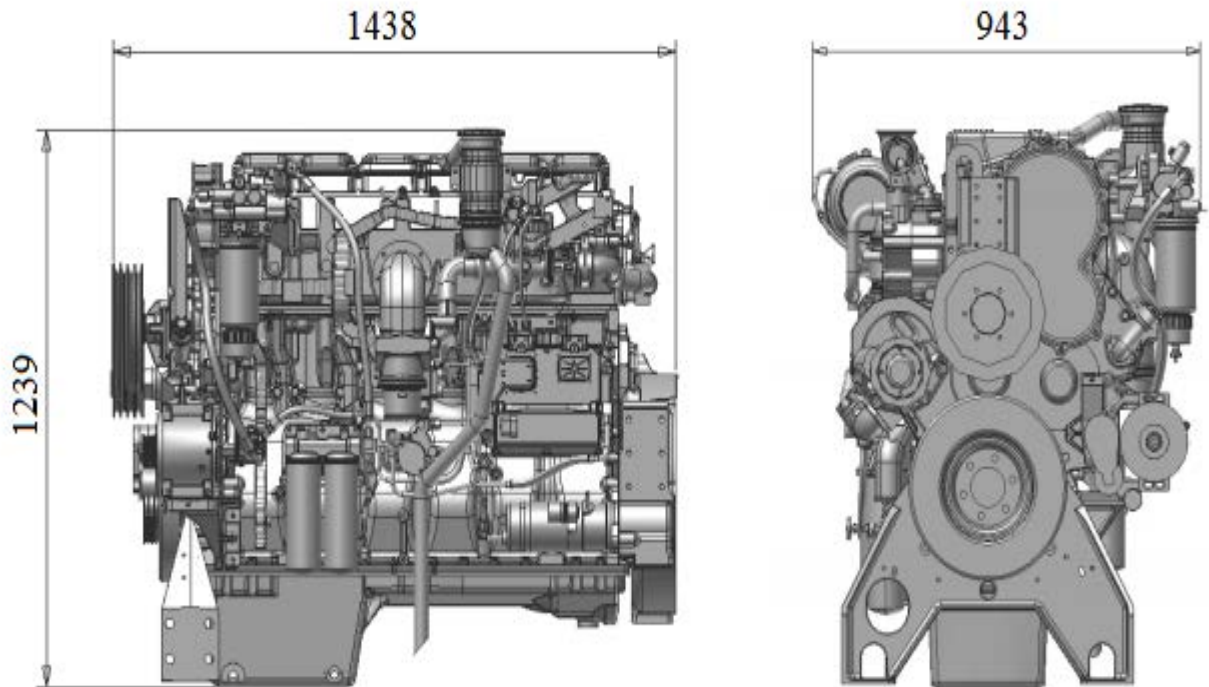


Рисунок 3.3 – Дизель C18 ACERT

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики дизеля C18 ACERT

Параметр	Значення
Максимальна потужність, кВт	597
Мінімальна потужність, кВт	429
Номінальна частота обертання, об/хв	1800-2100
Конфігурація двигуна	6-циліндровий, 4-тактний
Маса, кг	1673

Двигуни C18 ACERT потужністю 429-522 кВт (575-700 л.с.) при частоті обертання 1800-2100 об/хв. відповідають вимогам стандартів на викид забруднюючих речовин Stage II Китаю, EPA Tier 3 та EC Stage IIIA або еквівалентних їм.

Діаграма роботи дизеля C18 ACERT наведена на рисунку 3.4.

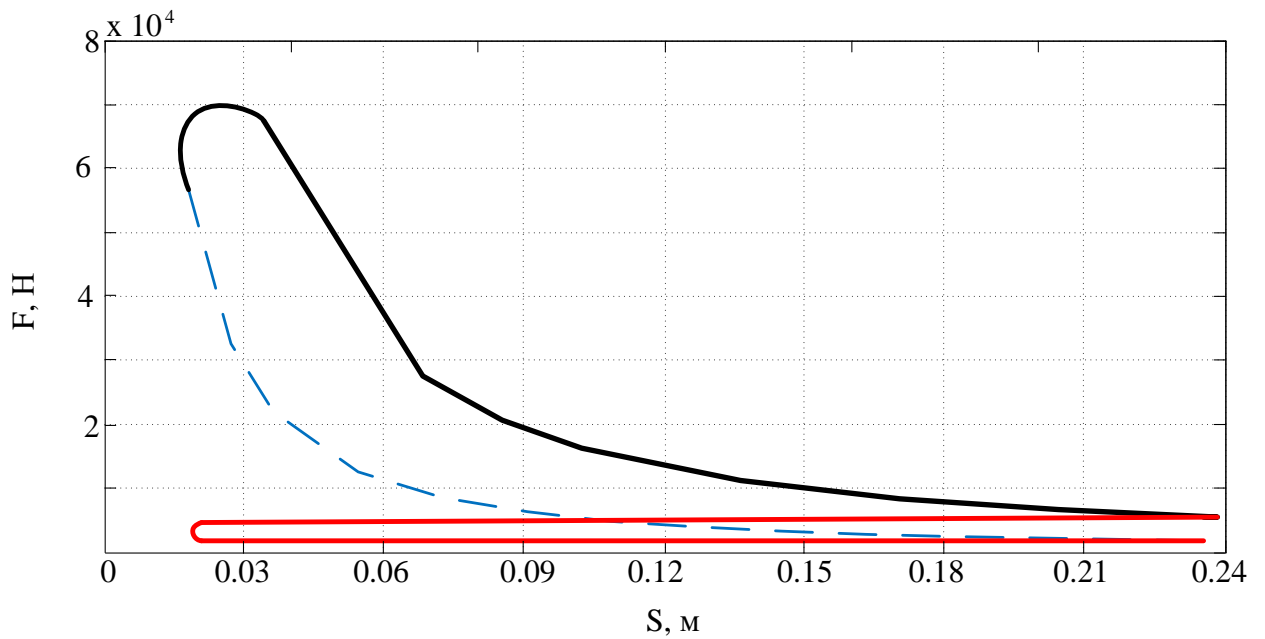


Рисунок 3.4 – Діаграма роботи дизеля C18 ACERT

Імітаційне моделювання дизеля виконувалось за методикою, що приведена в розділі 2.

Відповідно потужності запропонованого дизеля обрано синхронний генератор з постійними магнітами марки ГС-200-400. Його загальний вид представлений на рисунку 3.5, а технічні характеристики зведені в таблицю 2.



Рисунок 3.5 – Генератор ГС-200-400

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики дизеля ГС-200-400

Параметр	Значення
Потужність, кВт	200
Напруга, В	400
Номинальний струм, А	900
Кількість фаз	3
З'єднання фаз	зірка
Частота обертання, об/хв.	2000
Маса, кг	1600

Імітаційне моделювання генератора виконано за допомогою блоку Synchronous Machine pu Standart з розділу SimPowerSystems програмного комплексу Matlab.

3.3 Імітаційне моделювання накопичувачів енергії

Для забезпечення безперервної роботи тепловоза сумарна добова кількість енергії, яку повинен віддавати накопичувач енергії становити не менше 30% від загальних добових витрат енергії [29]. З огляду на це в якості прототипів накопичувачів енергії на тепловозі застосовані акумулятор LT-LYP 770 (рисунок 3.6) та іоністор ИКЭ 40/96 (рисунок 3.7), технічні характеристики яких приведені у таблицях 3.3 та 3.4 відповідно.

**Рисунок 3.6** - Акумулятор LT-LYP 770**Таблиця 3.3** – Основні технічні характеристики акумулятора LT-LYP 770

Параметр	Значення
Номінальна ємність, А·год.	770
Номінальна напруга, В	3,2
Питома енергія по масі, Вт.год/кг	105
Ресурс при глибині розрядки 80%, циклів	3000
Саморозряд при зберіганні, % в місяць	< 3
Робота при температурі, °С	від -40 до +50
Маса, кг	9,95

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики ИКЭ 40/96

Параметр	Значення
Напруга, В	110
Ємність, Ф	8,5
Вага, кг	34
Довжина, мм	400
Робота при температурі, °С	від -45 до +50



Рисунок 3.7 – Іоністорна батарея ИКЭ 40/96

Оскільки номінальна напруга акумулятора LT-LYP 770 складає 3,2 В, то для живлення ТЕД необхідно 65 послідовно з'єднаних акумуляторів з загальною напругою 198 В. Паралельне з'єднання накопичувачів дозволяє

отримати великі пускові струми, а також уникнути просадок за струмом при збільшенні навантажень на накопичувач. З метою підтримання номінального струму двигунів пропонується використовувати 3 паралельні гілки.

Іоністорна батарея повинна, з одного боку, забезпечувати можливість накопичення енергії під час рекуперативного гальмування, а з іншого – підтримувати вихідну напругу в діапазоні, що відповідає номінальному рівню для роботи зарядного пристрою [30, 31].

Як відомо, робота акумуляторної батареї відбувається за зарядно-розрядною характеристикою. Для обраного акумулятора розрядна та зарядна характеристики представлені на рис. 3.8 та рис. 3.9 відповідно.

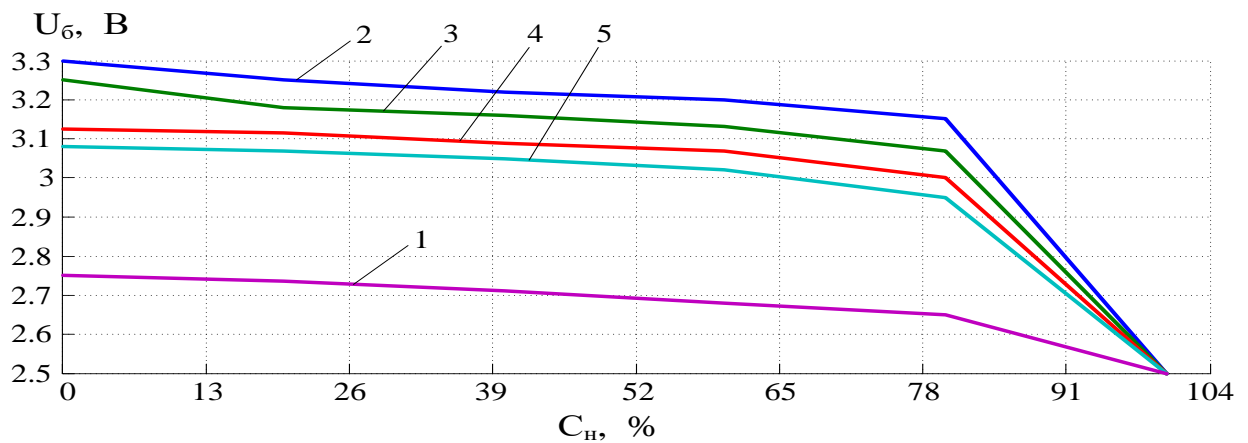


Рисунок 3.8 – Розрядні характеристики акумулятора LT-LYP 770

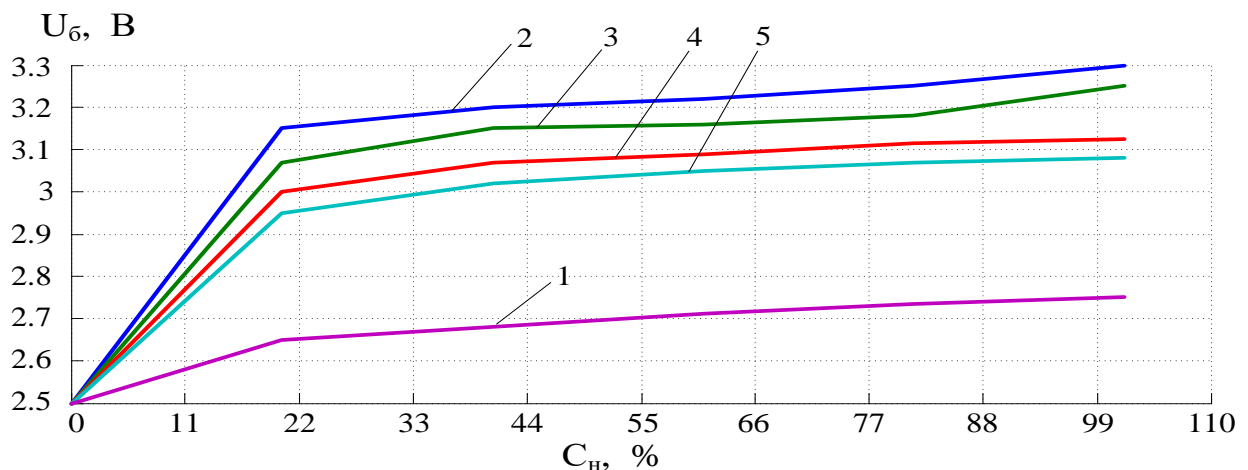


Рисунок 3.9 – Зарядні характеристики акумулятора LT-LYP 770

Значення сили струму S обраного акумулятора складає 770 А. Функціональна схема накопичувача енергії LT-LYP 770 представлена на рис. 3.10.

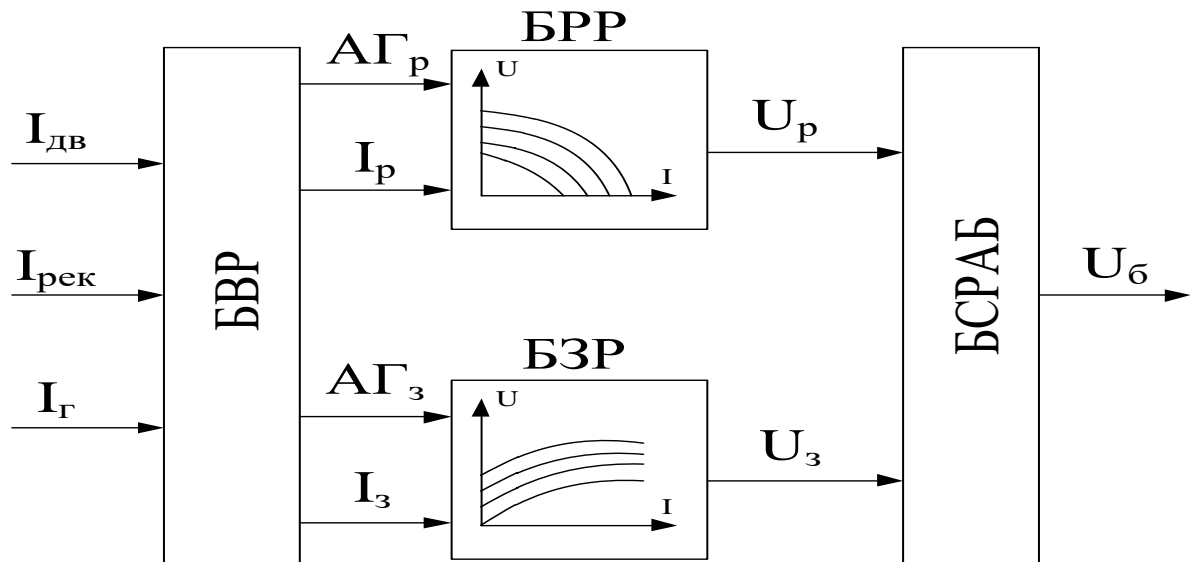


Рисунок 3.10 – Функціональна схема моделі акумуляторної батареї: БВР – блок вибору режиму роботи батареї, БЗР – блок, що реалізує режим заряду, БРР – блок, що реалізує режим розряду, БСРАБ – блок синхронізації режимів роботи АБ

Дана функціональна схема включає в себе чотири основних блока: БВР, БРР, БЗР та БСРАБ. На вхід БВР подаються три величини струмів: струм двигуна у тяговому режимі $I_{дв}$, струм двигуна у режимі рекуперації $I_{рек}$ та зарядний струм від синхронного генератора $I_Г$. В залежності від їх значень БВР вибирає зарядний або розрядний режим роботи АБ. БРР та БЗР відпрацьовують задані характеристики (рис. 3.8 і 3.9) та видають сигнали $U_з$ і $U_р$, які відповідають певному рівню напруги АБ, що, в свою чергу, залежать від амперер-годин її роботи у режимі заряду $АГ_з$ та розряду $АГ_р$, а також від величини розрядного $I_р$ і зарядного $I_з$ струмів. БСРАБ узгоджує між собою два вхідних сигнали $U_з$ і $U_р$ та видає результуюче значення напруги $U_б$ АБ.

Моделювання іоністора виконувалося на основі наступних рівнянь:

- напруга заряду конденсатора

$$U_з = E_p \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (3.2)$$

де E_p – Е.Р.С. двигуна в режимі рекуперації;

t – час заряду конденсатора;

τ – стала часу.

- зарядний струм

$$I_z = \frac{E_p}{R_v} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3.3)$$

де R_v – опір зарядного контуру.

- напруга розряду конденсатора

$$U_p = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3.4)$$

де U_0 – початковий розрядний рівень напруги.

- розрядний струм

$$I_p = \frac{U_0}{R_v} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3.5)$$

Функціональна схема, що відображає роботу конденсатора наведена на рисунку 3.11.

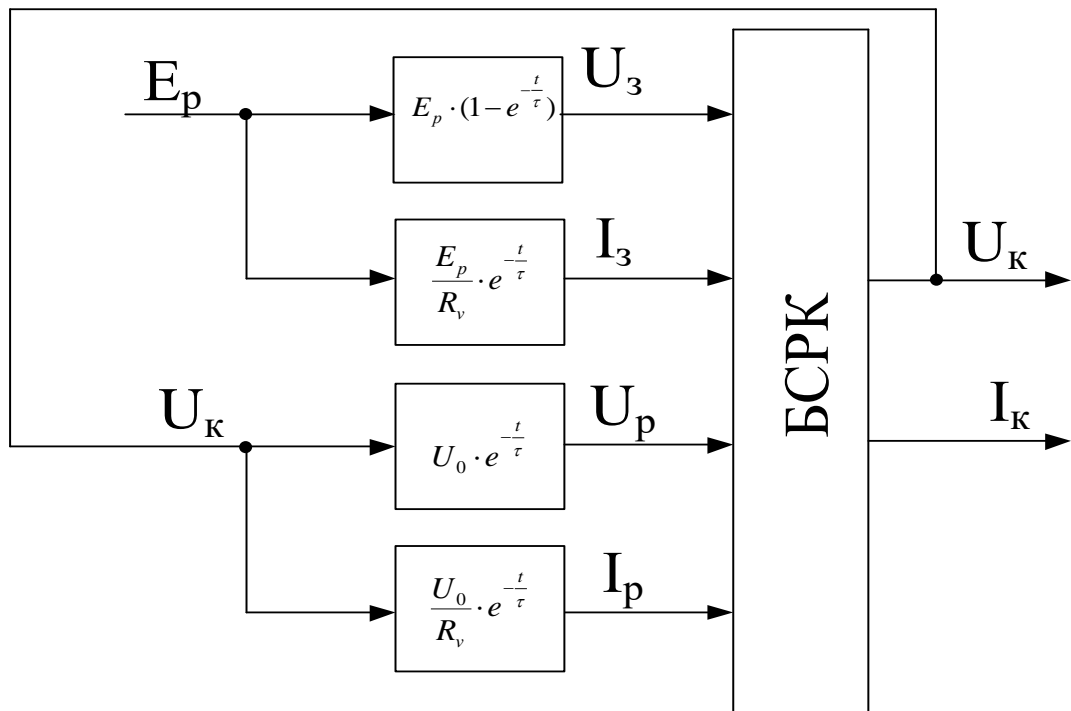


Рисунок 3.11 – Функціональна схема моделі іоністора

Використовуючи рівняння (3.2) та (3.4) були отримані значення напруг U_z і U_p та струмів I_z і I_p , які є вхідними величинами для БСРК. БСРК, в свою чергу, узгоджує між собою ці сигнали та видає результуюче значення напруги U_k та струму I_k конденсатора [32].

3.4 Результати імітаційного моделювання роботи гібридного тепловоза з двигуном постійного струму

На основі загальної функціональної схеми (рис. 3.2) та функціональних схем окремих блоків (АБ (рис. 3.10), К (рис. 3.11)) в середовищі Matlab було складено імітаційну модель роботи гібридного тепловоза, де був застосований тяговий двигун постійного струму з широтно-імпульсною системою керування. Модель руху поїзда розроблена на основі структурної схеми (рис. 2.15) з використанням профілю, що відповідає ділянці шляху Харків-Мерефа. В якості діаграм розгону поїзда були застосовані тахограми, що наведені у розділі 2 (рис. 2.18). У запропонованій моделі була врахована можливість переходу тягових двигунів у генераторний (рекуперативний) режим з метою накопичення енергії на іоністорах. Рекуперативне гальмування використовувалось до швидкості 10 км/год, з подальшим догальмуванням пневматичним гальмом.

При дослідженні роботи гібридного тепловозу на імітаційній моделі задавались тахограми з максимальними швидкостями в інтервалі 40-80 км/год з кроком 10 км/год. На рисунках 3.12 – 3.16 показані осцилограми роботи гібридного тепловоза з 10 вагонами на профілі шляху, що зображений кривою 5, при таких максимальних швидкостях.

Для підтримання поточної швидкості (крива 2) по заданій тахограмі (крива 1) машиністом проводилась зміна напруги на тягових двигунах шляхом зміни позиції контролера машиніста (крива 3). Зміна однієї позиції відповідає зміні рівня вихідної напруги широтно-імпульсного перетворювача на 10%. В тяговому режимі струм (крива 6) обмежувався на рівні 600А. Від'ємні значення струму на кривій відповідають режиму рекуперації та заряду конденсатора (крива 7). При досягненні напругою іоністора значення 300 В відбувався процес заряду АБ, величина напруги якої показане кривою 8. З метою дослідження тенденції зміни витрат палива від зміни режиму ведення поїзда існує необхідність у фіксації витрати пального, що відображено кривою 4.

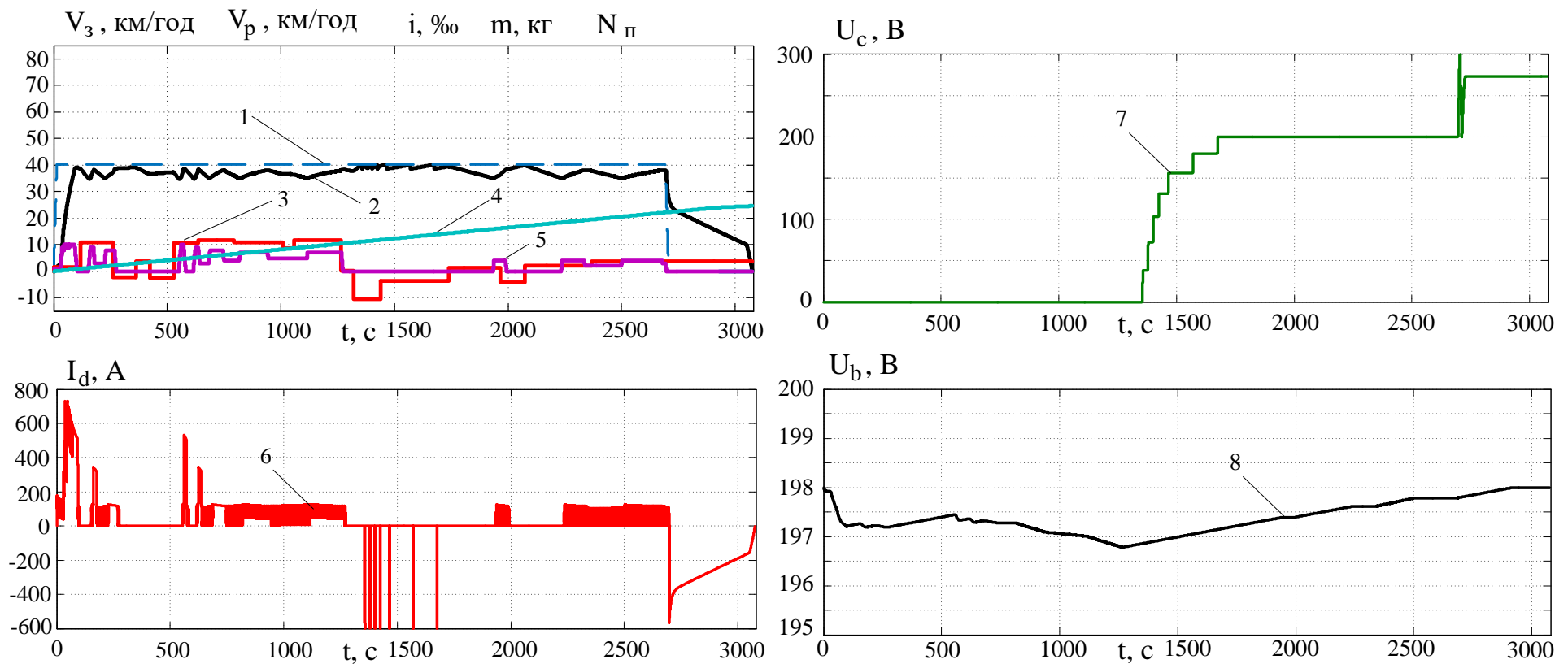


Рисунок 3.12 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 40 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

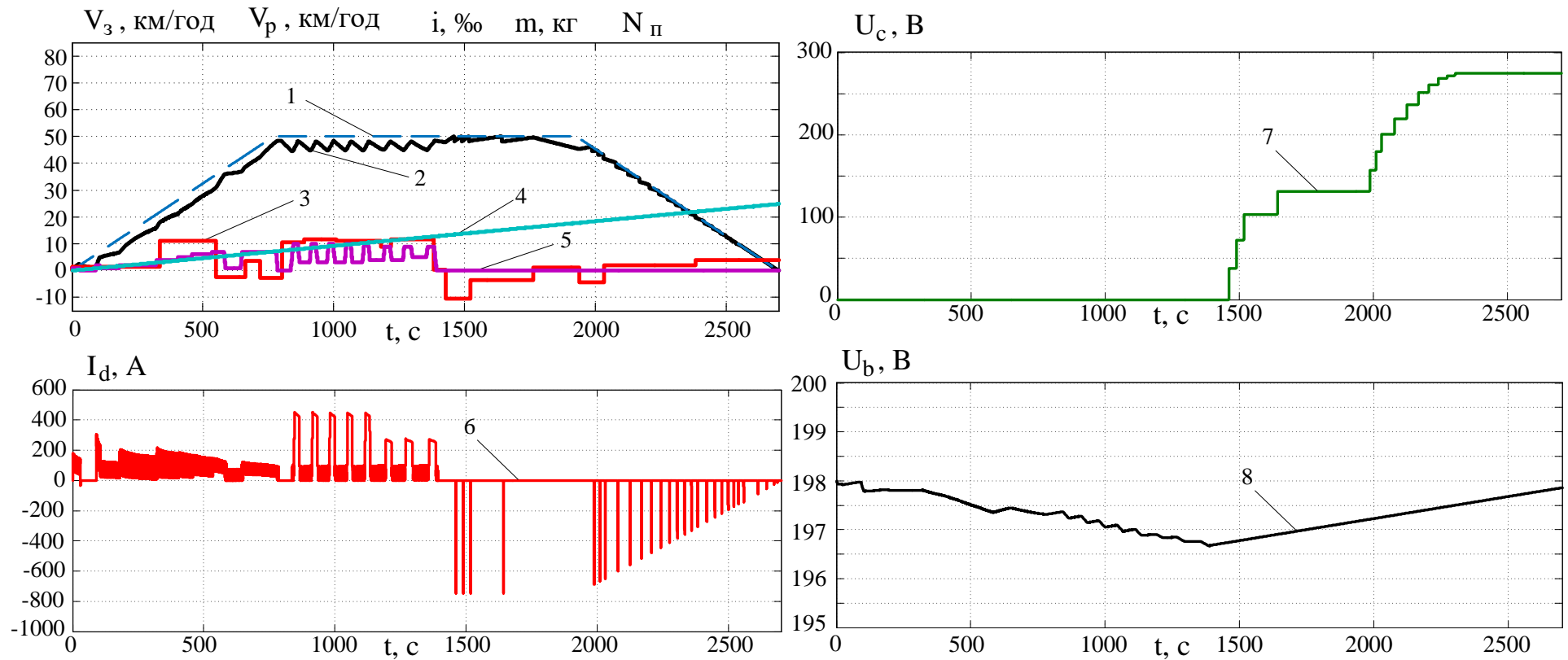


Рисунок 3.13 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 50 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

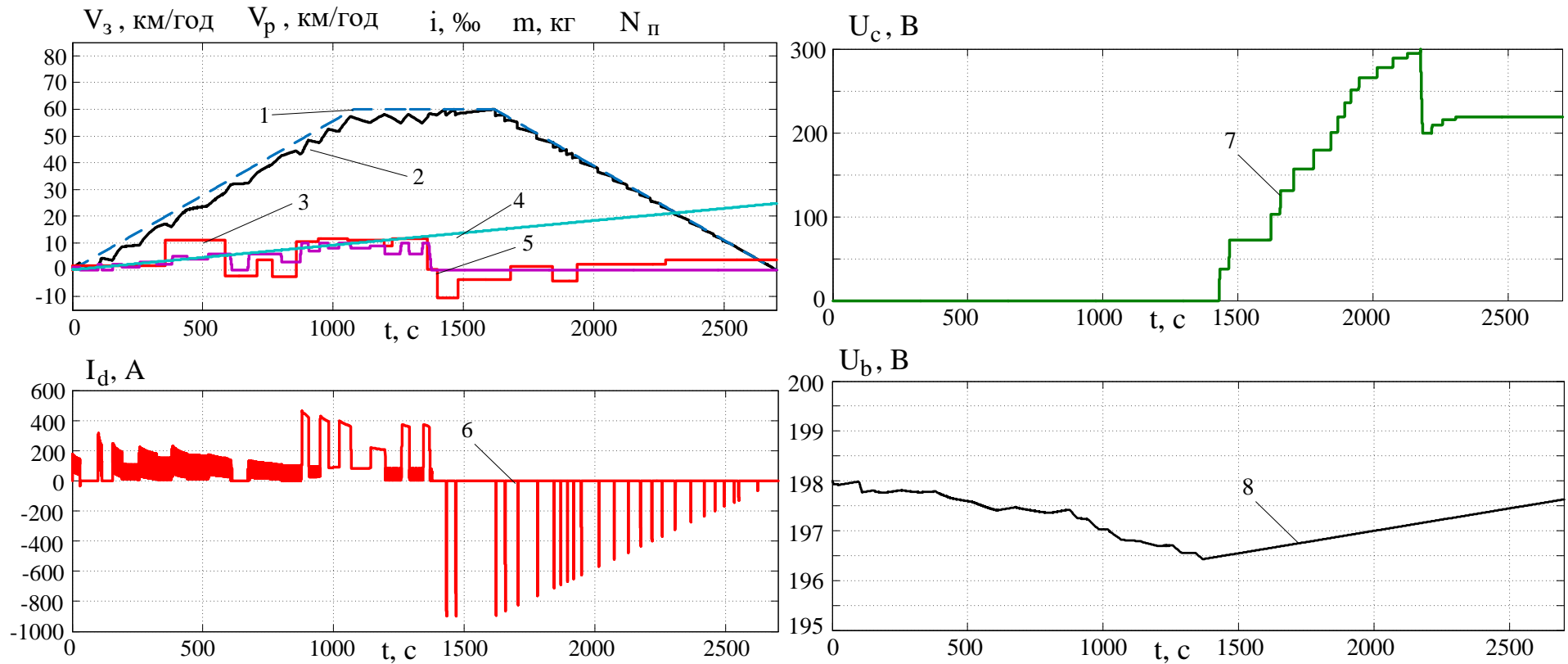


Рисунок 3.14 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 60 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

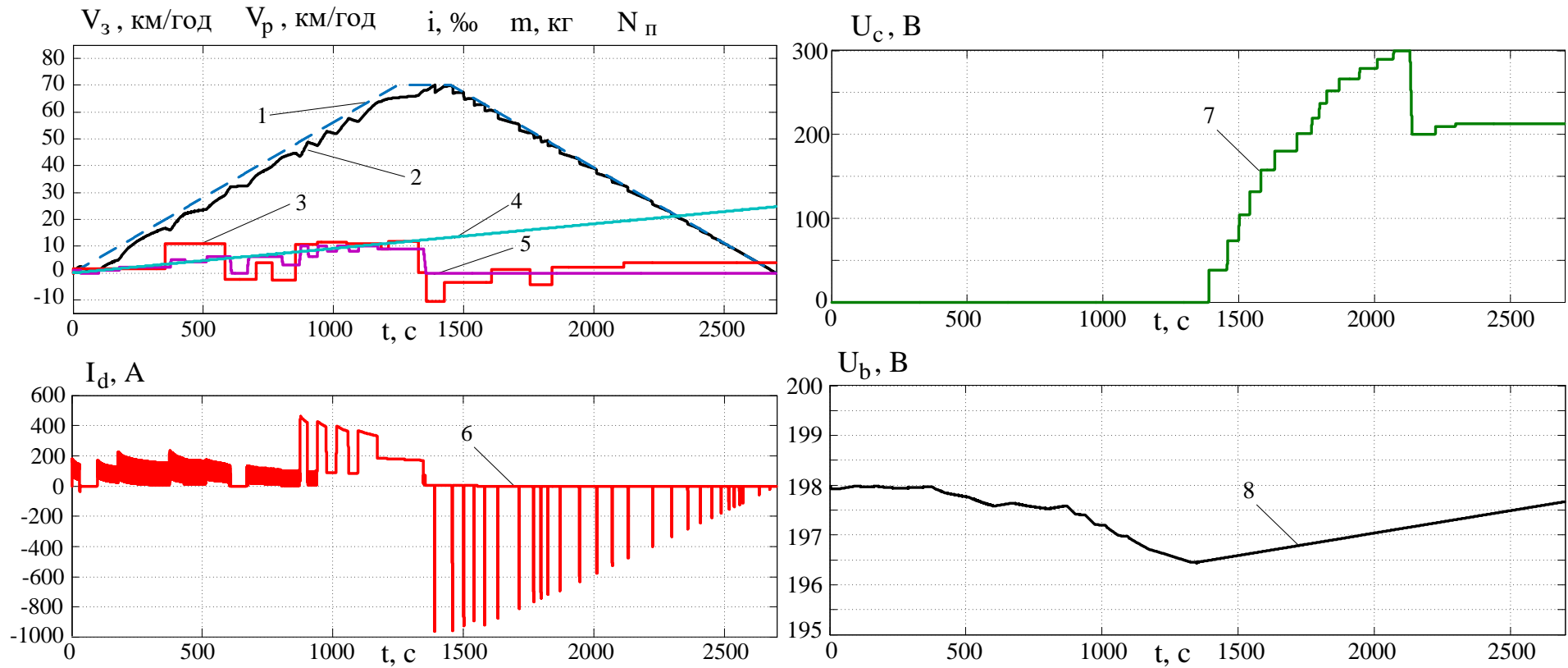


Рисунок 3.15 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 70 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

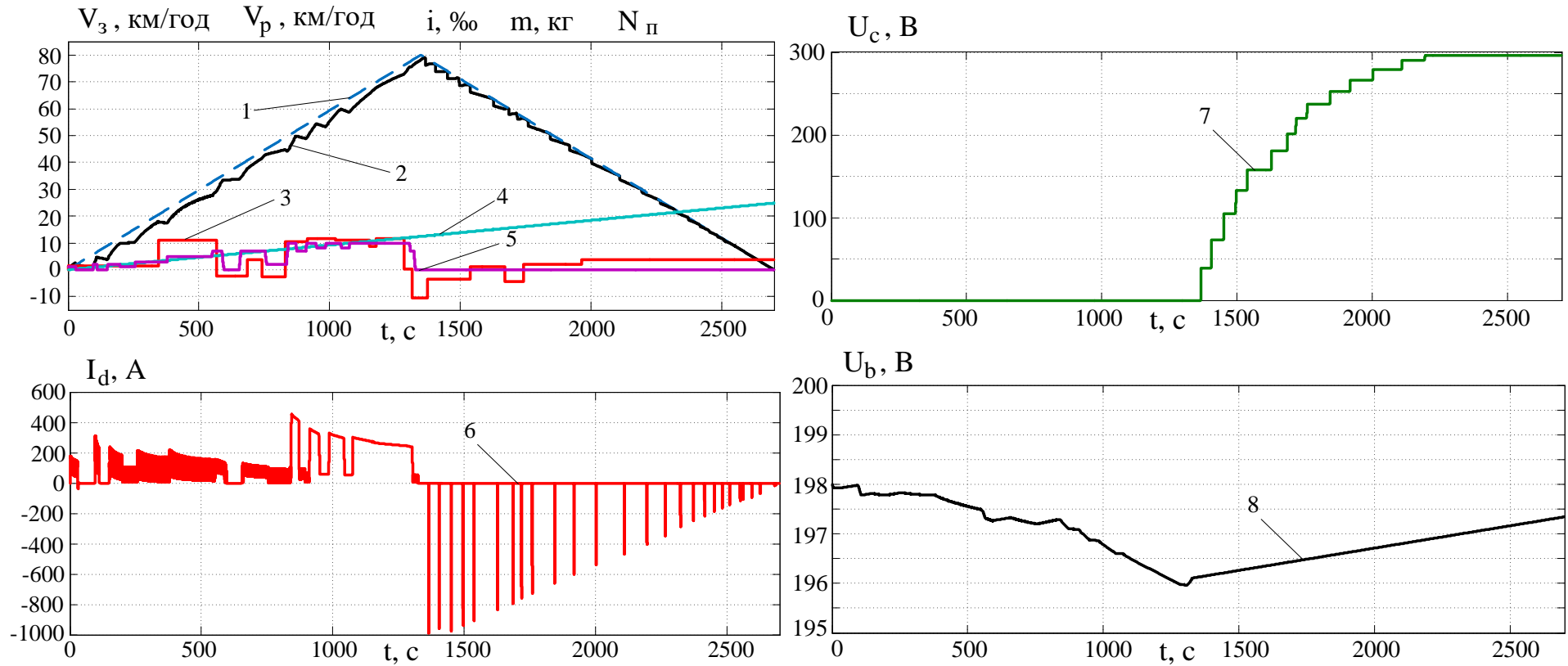


Рисунок 3.16 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 80 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

Таблиця 3.5 – Результати моделювання

Максимальна швидкість трикутної тахограми, км/год	Максимальна швидкість руху потяга за тахограмою, км/год	Кількість витрат палива, кг	Величина напруги АБ, В	Величина напруги К, В
70	40	24,48	198	273
	50	24,41	197,9	283
	60	24,24	197,6	234
	70	24,39	197,5	213
75	40	24,43	198	277
	50	24,46	197,9	279
	60	24,37	197,7	228
	70	24,38	197,6	208
80	40	24,58	198	271
	50	24,53	197,8	274
	60	24,47	197,6	221
	70	24,32	197,6	210
	80	24,57	197,3	296
85	43	24,98	197,9	278
	50	25,27	197,6	284
	60	24,68	197,8	241
	70	24,73	197,7	253
	80	25,04	197,4	284
90	50	25,09	197,3	292
	60	24,82	197,4	240
	70	24,67	197,2	261
	80	25,11	196,9	289
95	50	24,64	197,1	298
	60	24,59	197,2	235
	70	24,37	197	242
	80	24,61	196,7	287

Використовуючи данні таблиці 3.5 будуємо залежності у вигляді тривимірних поверхонь: витрати палива (рис. 3.17), величина напруги АБ (рис. 3.18), величина напруги К (рис. 3.19) від максимальної швидкості тахограми та часу руху перегоном.

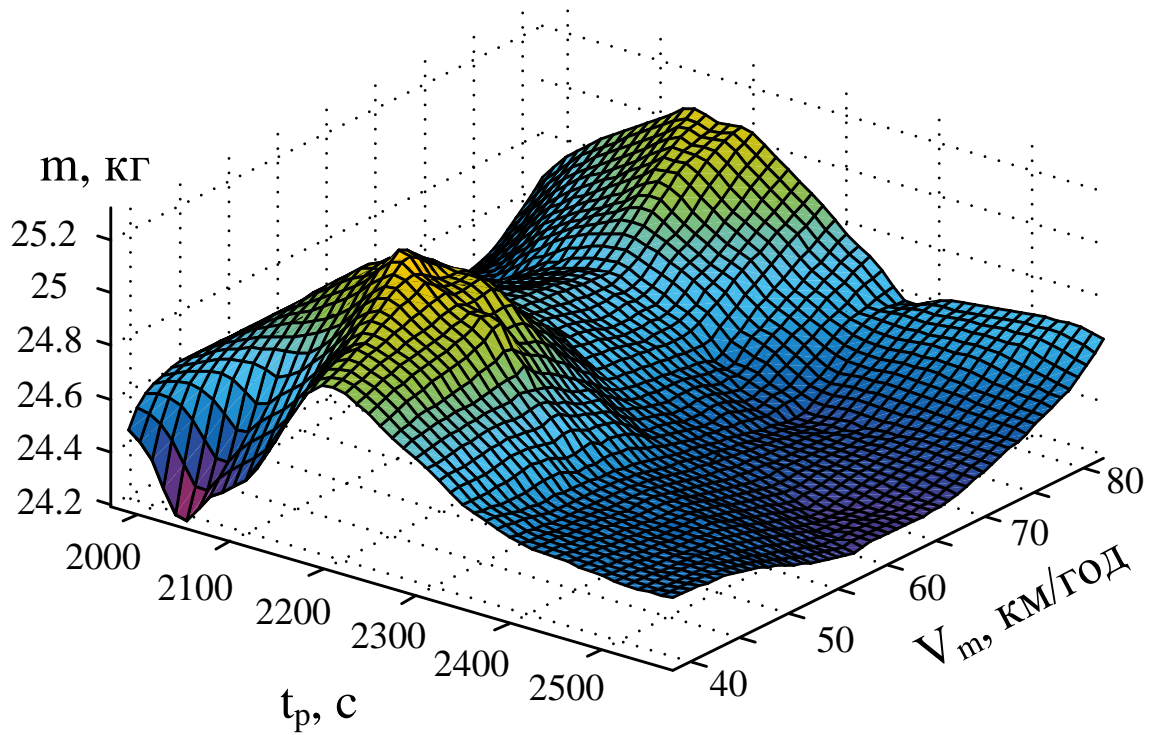


Рисунок 3.17 – Зміна витрат палива гібридним тепловозом в залежності від максимальної швидкості та часу руху по перегону

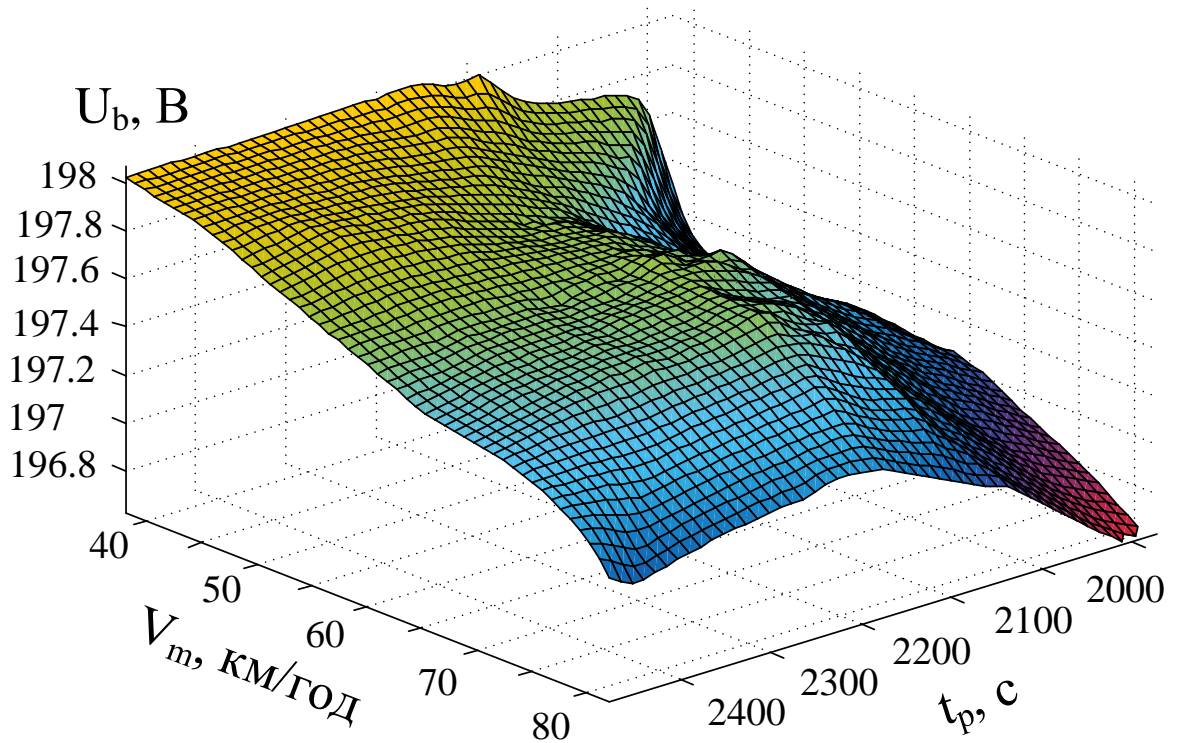


Рисунок 3.18 – Зміна напруги АБ в залежності від максимальної швидкості та часу руху по перегону

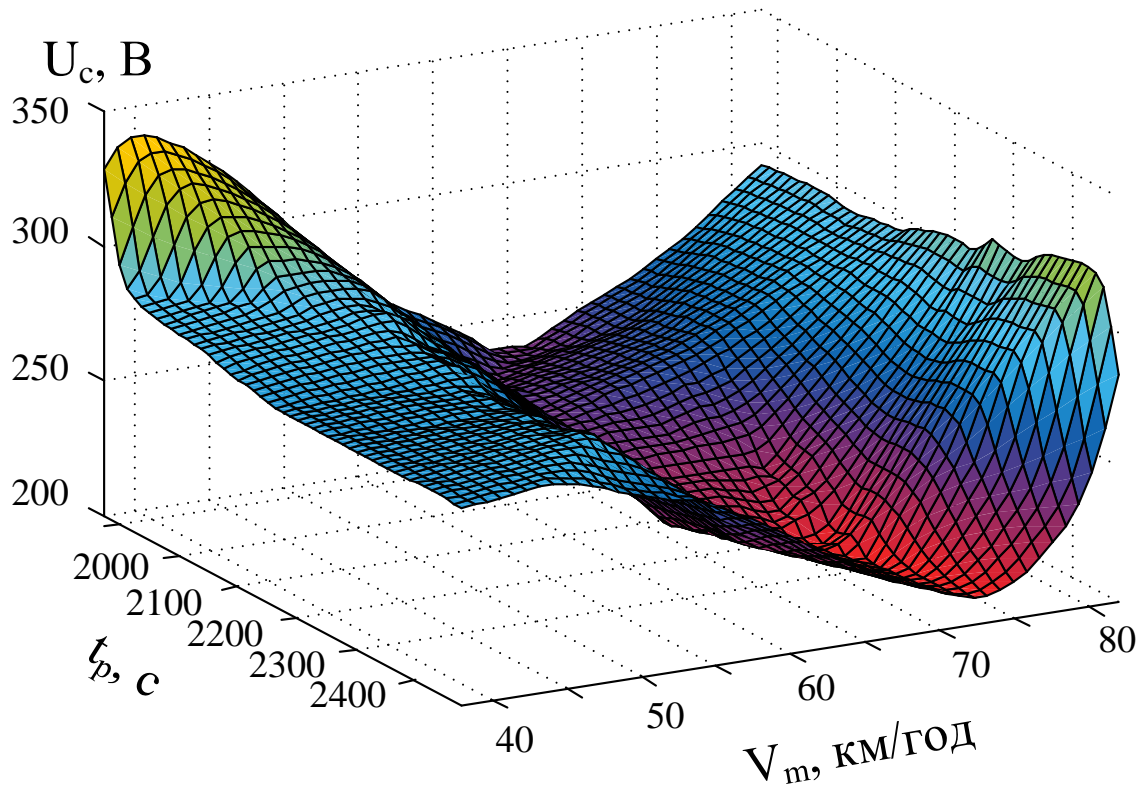


Рисунок 3.19 – Зміна напруги K в залежності від максимальної швидкості та часу руху по перегону

Отримана залежність витрат палива (рис. 3.17) дає змогу стверджувати, що тепловоз із гібридною силовою установкою є більш енергоефективним, ніж традиційний. Спостерігаються два явних максимуми при швидкостях 80 км/год та 50 км/год для трикутної діаграми з максимальною швидкістю 90 км/год. Величини цих екстремумів складають 25,11 та 25,09 кг відповідно. Зменшення витрат палива тепловозом знаходиться у межах 5,62-11,2 кг у порівнянні з традиційною системою (табл. 2.3), що складає від 18,7% до 31,3%.

В поверхні (рис. 3.19) спостерігається зона мінімального значення напруги на K (208-261 В) в діапазоні швидкостей 55-75 км/год, що відповідає його переходу в режим заряду АБ. У цьому ж діапазоні швидкостей на поверхні витрат палива спостерігається зона мінімальних значень в результаті зменшення навантаження на дизель.

Аналізуючи залежність величини напруги АБ (рис. 3.18) спостерігається тенденція до збільшення заряду АБ при зменшенні максимальних швидкостей руху по перегону.

3.5 Імітаційне моделювання ВІД

З розвитком напівпровідникової електроніки все більш широкого застосування знаходять ВІД, які в порівнянні з ДПС мають низку переваг. ВІД відноситься до класу синхронних реактивних машин з вентильним керуванням [33, 34, 35]. ВІД представляє собою сукупність електромеханічного перетворювача енергії – індукторної машини (рисунок 3.20) і електронного блоку керування [36]. Необхідними частинами блоку керування є:

- блок керування (БК) комутацією, що містить алгоритм і систему керування електронним комутатором;
- датчики положення ротора (ДПР) й струму фази, які можуть виконуватися інтегрованими із блоком керування;
- електронний комутатор (ЕК), що забезпечує підключення обмоток індукторної машини до джерела живлення.

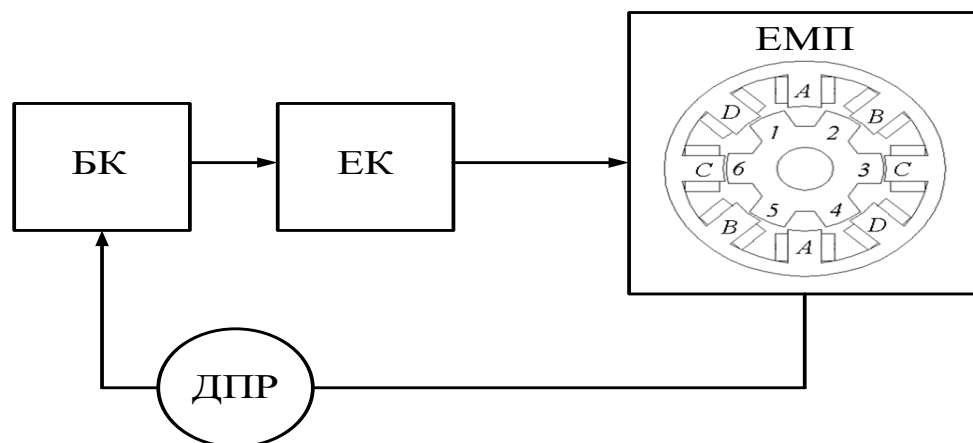


Рисунок 3.20 – Функціональна схема ВІД

Принцип дії ВІД заснований на реактивній взаємодії зубців статора й ротора. Зубці ротора, під дією струму, що протікає в котушках фази, намагаються зайняти положення, що відповідає найбільшому значенню енергії магнітного поля, що відповідає режиму двигуна. Потокосцеплення

котушок залежать від взаємного кутового положення зубців статора й ротора і струму котушок [37, 38].

В якості електромеханічного перетворювача енергії був обраний чотирифазний ВІД (ДВІ-165), який має конфігурацію 8/6 та представлений на рисунку 3.21, а технічні характеристики зведено в таблицю 3.6.

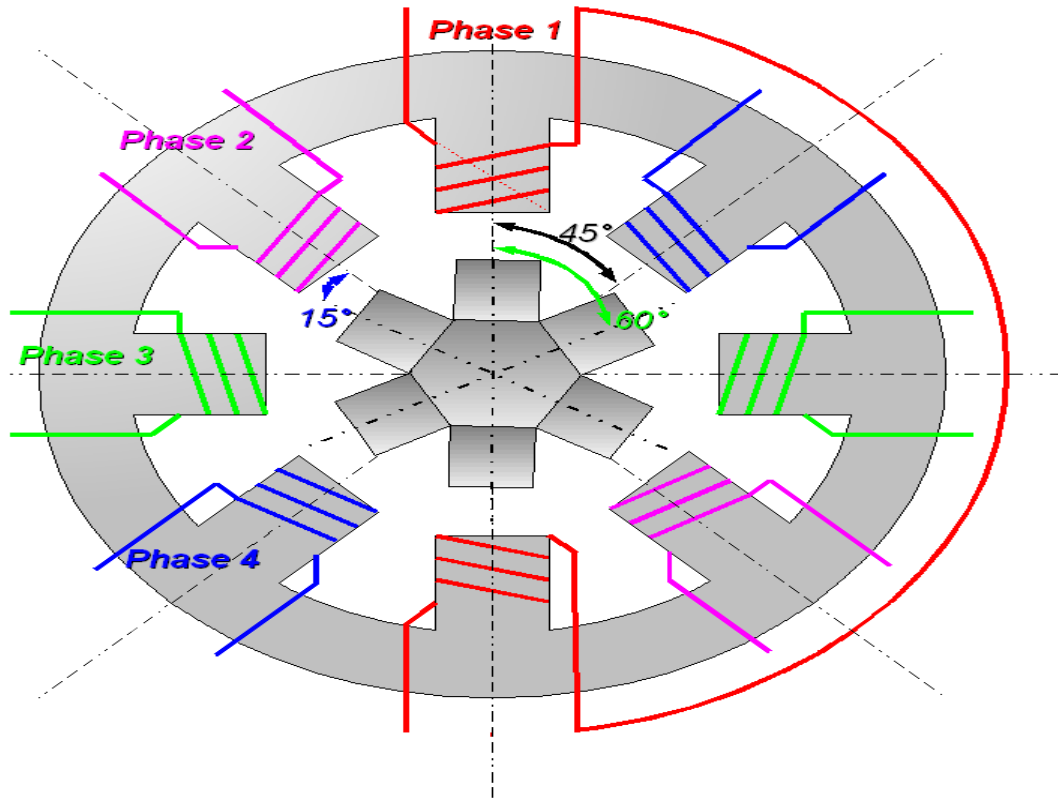


Рисунок 3.21 – Чотирифазний ВІД конфігурації 8/6

Таблиця 3.6 – Технічні характеристики двигуна ДВІ-165

Електромеханічні параметри	
U_H, B	200
I_H, A	850
M_H, Hm	875,5
$n_H, об / хв$	1800
$R_\phi, Ом$	0,135
$L_d, мГн$	1,72
$L_q, мГн$	0,36

Використовуючи рівняння Лагранжа для такого ЕМП отримуємо систему диференціальних рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_A}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial i_A}} \left(e_A - r_A i_A - \frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right) \\ \frac{di_B}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial i_B}} \left(e_B - r_B i_B - \frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right) \\ \frac{di_C}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial i_C}} \left(e_C - r_C i_C - \frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right) \\ \frac{di_D}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial i_D}} \left(e_D - r_D i_D - \frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right) \\ M_{\partial \delta} = f(i_A, i_B, i_C, i_D, \theta) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{\partial \delta} - M_c}{J} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{array} \right. \quad (3.6)$$

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; θ – кут повороту ротора; ω – кутова швидкість; $M_{\partial \delta}$ – рушійний момент; M_c – момент опору; J – момент інерції ротора.

Система рівнянь (3.6) 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. За результатами аналізу магнітного поля можна визначити значення потокозчеплення фаз ВІД і значення електромагнітного моменту.

Для стаціонарного магнітного поля метод кінцевих елементів в двомірній розрахунковій моделі і прямокутній системі координат полягає в мінімізації нелінійного енергетичного функціонала [39, 40].

Для вирішення поставленого завдання використовувався програмний комплекс FEMM, що дозволяє розрахувати стаціонарні плоскопаралельні магнітні поля.

За результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів можна визначити потокозчеплення обмоток, а також величину електромагнітного моменту.

$$\Psi_A = l_\delta \sum_K w_{AK} (A_{n,A} - A_{1,A}); \quad (3.7)$$

$$\Psi_B = l_\delta \sum_K w_{BK} (A_{n,B} - A_{1,B}); \quad (3.8)$$

$$\Psi_C = l_\delta \sum_K w_{CK} (A_{n,C} - A_{1,C}); \quad (3.9)$$

$$\Psi_D = l_\delta \sum_K w_{DK} (A_{n,D} - A_{1,D}), \quad (3.10)$$

де l_δ – довжина статора;

$A_{n,A}, A_{n,B}, A_{n,C}, A_{n,D}$ – потенціали у провідниках однієї секції фази А, В, С, D;

k – кількість секцій фази;

w_K – кількість витків секції.

$$\vec{M} = \frac{1}{2} l_\delta \sum_{l_r} \left((\vec{H} \times (\vec{B} \times \vec{n}) + \vec{B} \times (\vec{H} \times \vec{n})) \times \vec{r} \right), \quad (3.11)$$

де l_r – контур інтегрування.

Таким чином, вирази 3.7 - 3.10 і 3.11 являють собою потокозчеплення і електромагнітний момент як функцію двох змінних (струму фази, а також кутової координати ротора), які можуть бути

визначені шляхом розрахунку магнітного поля машини на кожному кроці інтегрування [40, 41, 42].

У постпроцесорі FEMM для розрахункової моделі ВІД задаємося збуджуючим впливом шляхом завдання величини струму котушки, намотаної на зубець статора. Також приймаємо, що котушка має один виток. У кожній замкнутій області машини задаємо матеріал і провідність даної ділянки машини. Криві намагнічування матеріалу зубців статора і ротора взяті з довідкової літератури. При розрахунках прийнято, що використовується електротехнічна сталь 2411 [43].

Розподіл магнітних ліній в розрахунковій схемі ВІД під час узгодженого і неузгодженого положень при включеній фазі А представлені на рисунки 3.22 та 3.23.

За допомогою підпрограми, написаної в текстовому файлі на мові Lua автоматизуємо процес розрахунку. Граничними областями при цьому є положення зубців статора і ротора – від неузгодженого до узгодженого положень, що складає $22,5^\circ$, а також допустимих значень МРС на рівні 40000А.

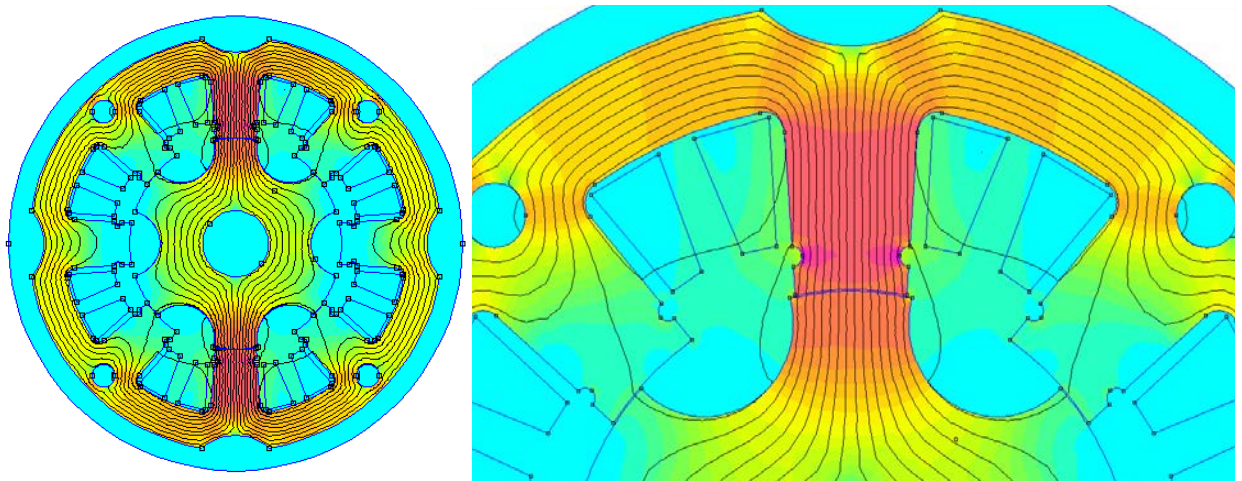


Рисунок 3.22 – Розподіл магнітного поля у зубцях ВІД при узгодженому положенні

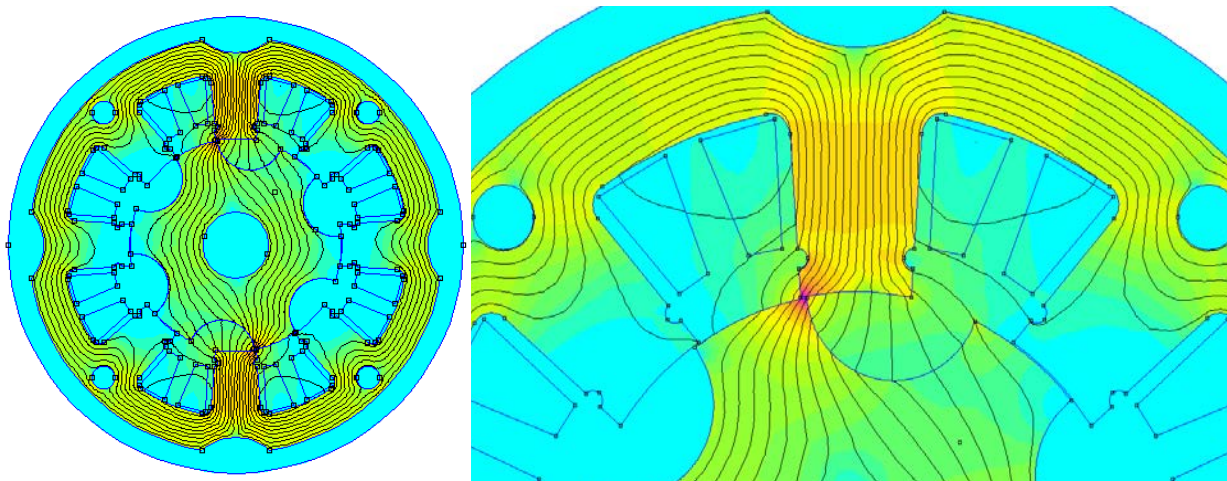


Рисунок 3.23 – Розподіл магнітного поля у зубцях ВІД при розузгодженому положенні

Результатом розрахунку є тривимірні поверхні, що показують залежність потокозчеплення фази та електромагнітного моменту від МРС та кута повороту ротора (рис. 3.24, 3.25).

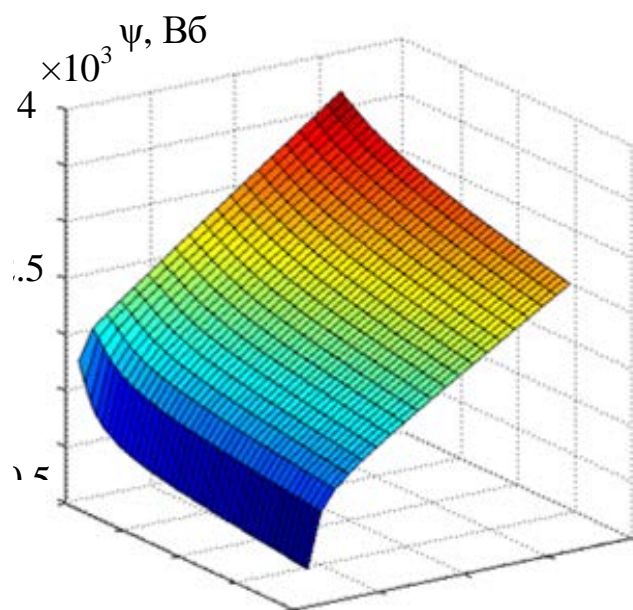


Рисунок 3.24 - Залежність потокозчеплення фази від МРС та кута повороту ротора

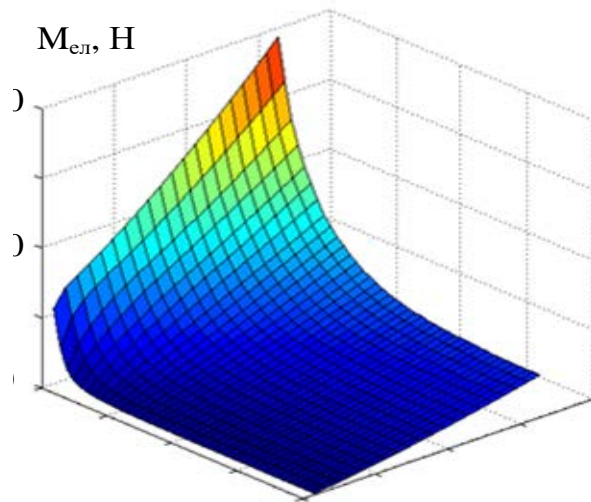


Рисунок 3.25 - Залежність електромагнітного моменту від МРС та кута повороту ротора

Для отримання безперервних залежностей потокозчеплення результати цифрового моделювання пропонується апроксимувати безперервними функціями. При виборі типу функції вирішувалися наступні завдання:

- функція і її похідні по куту повороту ротора на початку і кінці інтервалу на якому проводиться апроксимація (полюсний розподіл ВІД) повинні бути однаковими;
- запропонована функція повинна враховувати зміни струмів не тільки власної, а й сусідніх фаз;
- запропонована функція повинна мати досить простий вигляд аналітичних частинних похідних по всіх координатах.

З огляду на вище сказане запропонована функція виду:

$$f(i_A, \theta) = \sum_{l=1}^m \left[\left(\sum_{h=0}^n aa_h \cdot i_A^h \right) \times \cos(l\theta) + \left(\sum_{h=0}^n bb_h \cdot i_A^h \right) \sin(l\theta) \right] + \sum_{h=0}^n cc_h \cdot i_A^h, \quad (3.12)$$

де aa_h, bb_h, cc_h – коефіцієнти полінома;

i_A – струм фази А;

θ – кут повороту ротора;

l – номер гармоніки.

Для визначення коефіцієнтів полінома пропонується використовувати метод на основі поліномів Чебишева.

Зниження порядку математичної моделі без обмеження можливо отримати, якщо визначати момент за результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів (за допомогою програми FEMM), а потім апроксимувати його у поліном вигляду:

$$M_{dB}(i_A, \theta) = \sum_{l=1}^m \left[\left(\sum_{h=0}^n m a_h \cdot i_A^h \right) \times \cos(\omega l \theta) + \left(\sum_{h=0}^n m b_h \cdot i_A^h \right) \sin(\omega l \theta) \right] + \sum_{h=0}^n m c_h \cdot i_A^h, \quad (3.13)$$

де $ma_{hijk}, mb_{hijk}, mc_{hijk}$ – коефіцієнти полінома визначені за методом Чебишева.

Поліном, що описує функцію потокозчеплення фази А (В, С) має вигляд:

$$\Psi_A(i_A, \theta) = w \sum_{l=1}^m \left[\left(\sum_{h=0}^n a(b,c) a_h \cdot i_A^h \right) \times \cos(\omega l \theta) + \left(\sum_{h=0}^n a(b,c) b_h \cdot i_A^h \right) \sin(\omega l \theta) \right] + w \sum_{h=0}^n a(b,c) c_h \cdot i_A^h, \quad (3.14)$$

де $a(b,c)a_h, a(b,c)b_h, a(b,c)c_h$ – коефіцієнти полінома для фази А (В, С) визначені з використанням поліномів Чебишева;

w – кількість витків обмотки однієї фази.

Використовуючи раніш отриману систему рівнянь (3.6), складаємо структурну схему чотирифазного ВІД, що наведена на рисунку 3.26.

Невід'ємною складовою вентиляно-індукторного приводу (ВІП) є ЕК. ЕК у ВІП необхідний для підключення фаз двигуна до джерела живлення в залежності від сигналу датчика положення ротора. Так як робота ВІД не залежить від напрямку струму в фазі, то для комутації струму в ній зазвичай застосовується півмостова (однонапівперіодна) схема. При цьому на кожен фазу необхідно два ключа і два зворотних діода. Таким чином, число силових елементів зростає пропорційно числу фаз. Для живлення чотирифазного ВІД схема ЕК представлена на рисунку 3.27.

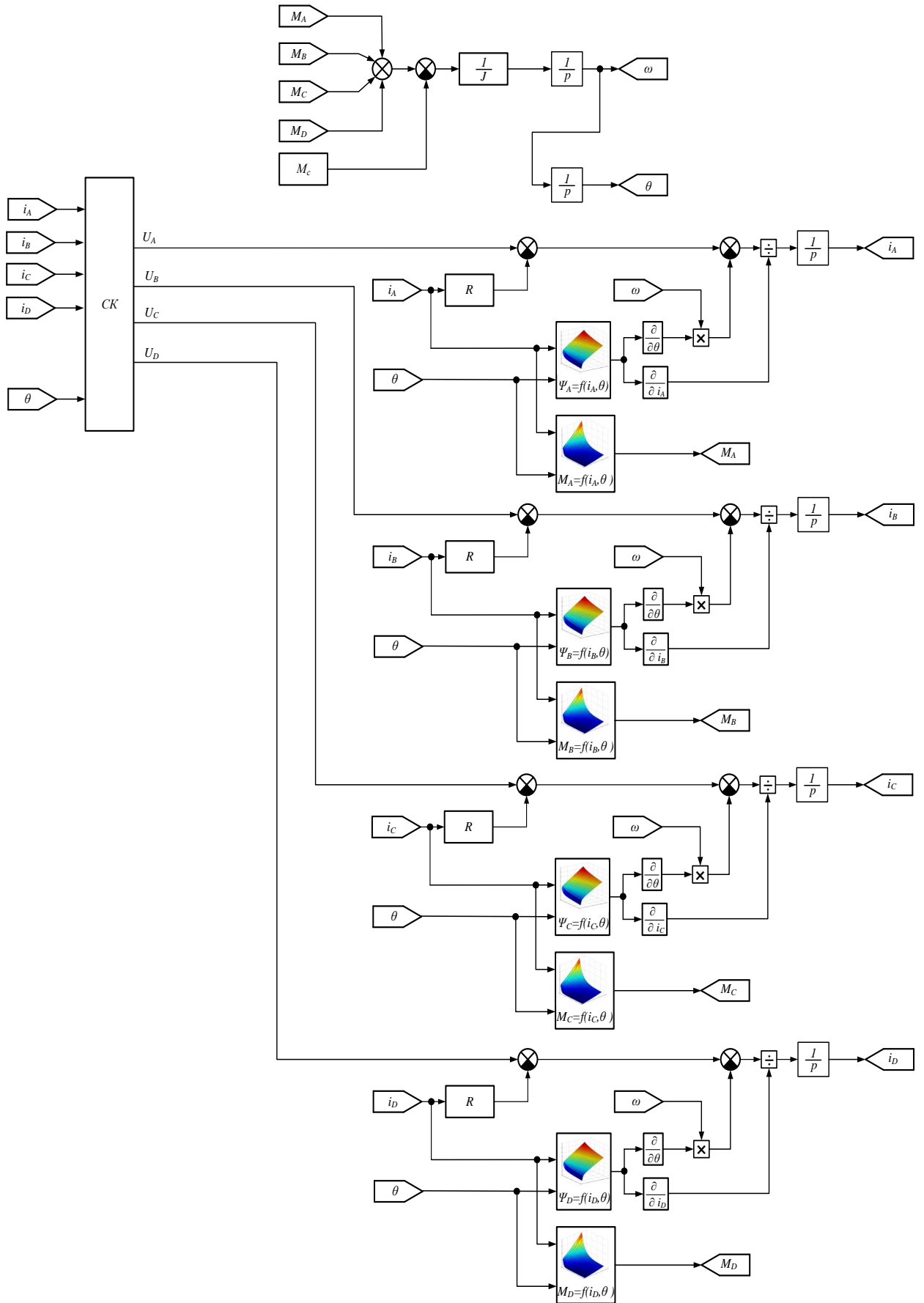


Рисунок 3.26 – Структурна схема ВІД

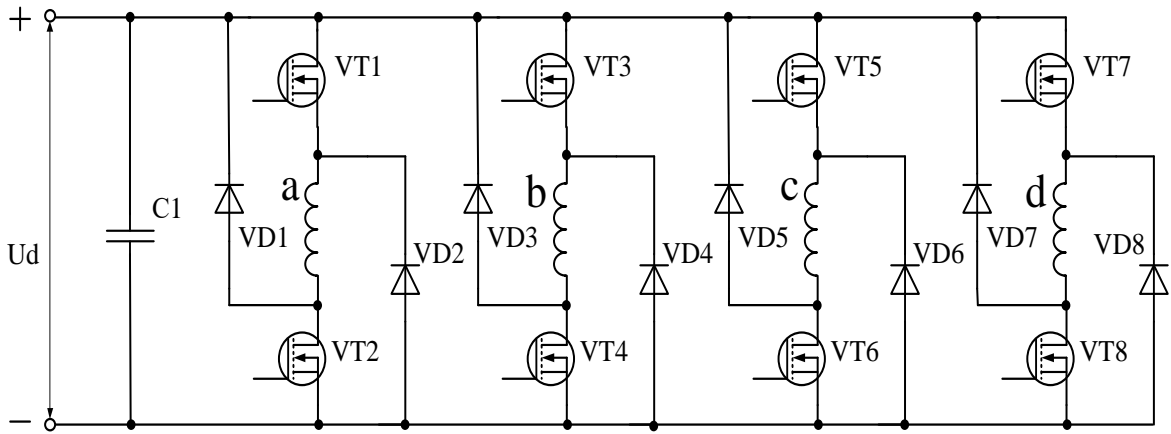


Рисунок 3.27 – Схема ЕК для 4-фазного ВІД

При моделюванні ЕК були використані технічні характеристики IGBT-транзистора MIO1800-17E10 та діода Д143-1000-18-УХЛ2. Їх моделювання зводиться до опису двох стійких станів: відкритого і закритого. У відкритому стані транзистор знаходиться в режимі насичення і характеризується активним опором прямого каналу. Закритий стан транзистора характеризується нескінченно великим опором каналу. У відкритому стані діод має падіння напруги на рівні 0,8-1,2В, а в закритому стані опір діода приймається рівним нескінченності. За допомогою ЕК реалізована одиночна симетрична комутація фаз з обмеженням струму на рівні 600А.

Використовуючи структуру (рис. 3.26), а також запропоновану схему ЕК було створено імітаційну модель у середовищі Matlab. Результатами моделювання є отримані залежності струму двигуна (рис. 3.28), моменту (рис. 3.29), швидкості (рис. 3.30).

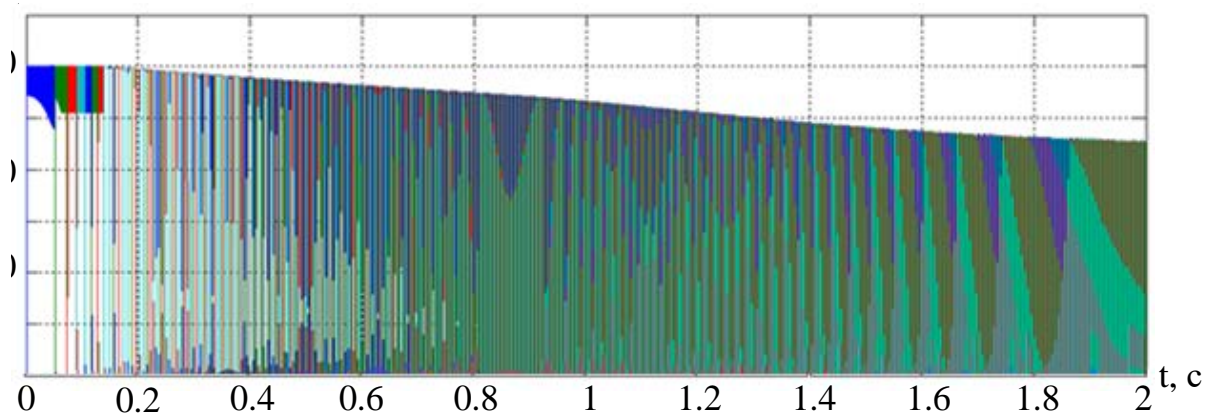


Рисунок 3.28 – Струм у обмотках ВІД

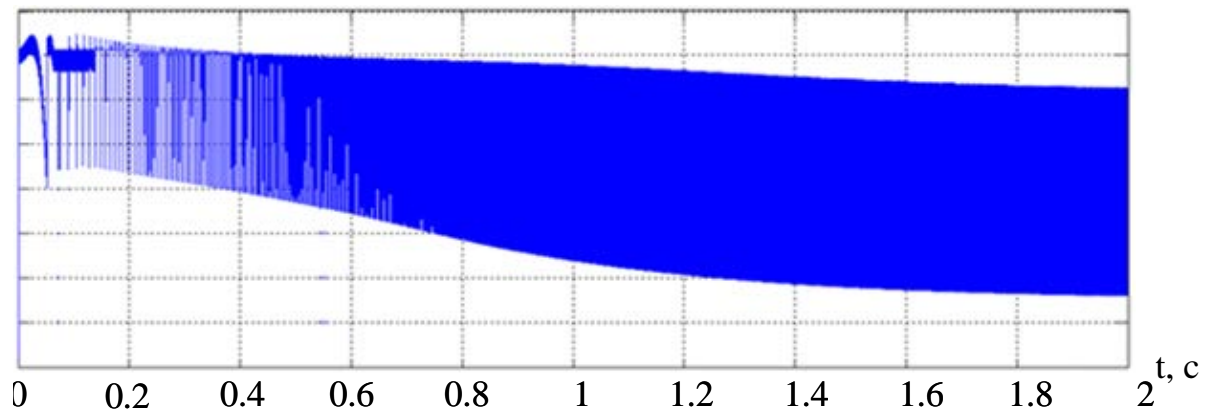


Рисунок 3.29 – Момент на валу вентильно-індукторного двигуна

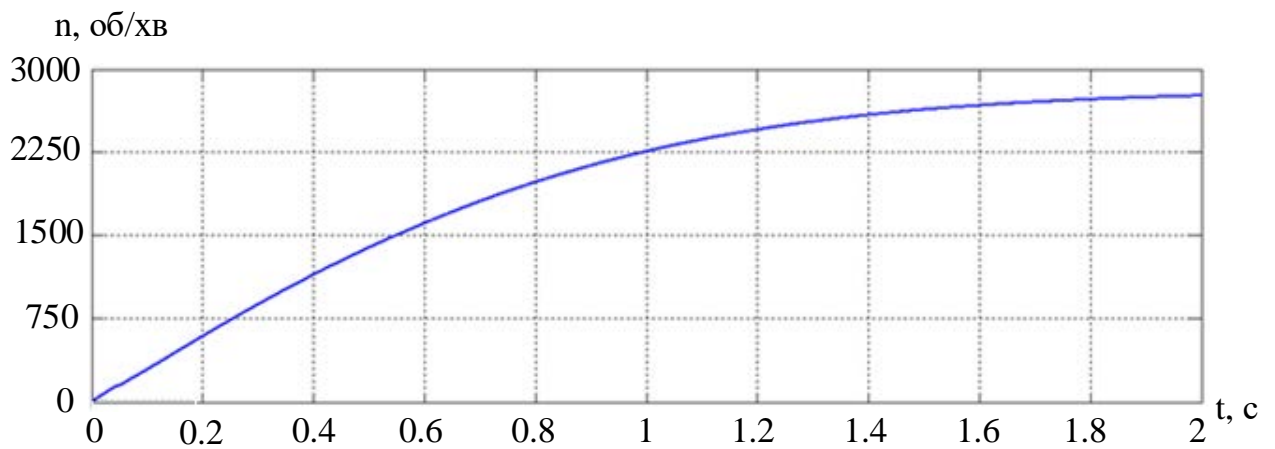


Рисунок 3.30 – Швидкість обертання вала ВІД

3.6 Результати імітаційного моделювання роботи гібридного тепловоза з двигуном постійного струму

При дослідженні роботи гібридного тепловозу з ВІП була використана імітаційна модель, що розглянута вище, за винятком застосування в якості приводного нового типу двигуна, а саме ВІД.

У результаті імітаційного моделювання були отримані основні осцилограми роботи локомотива, що наведені на рис. 3.31-3.35.

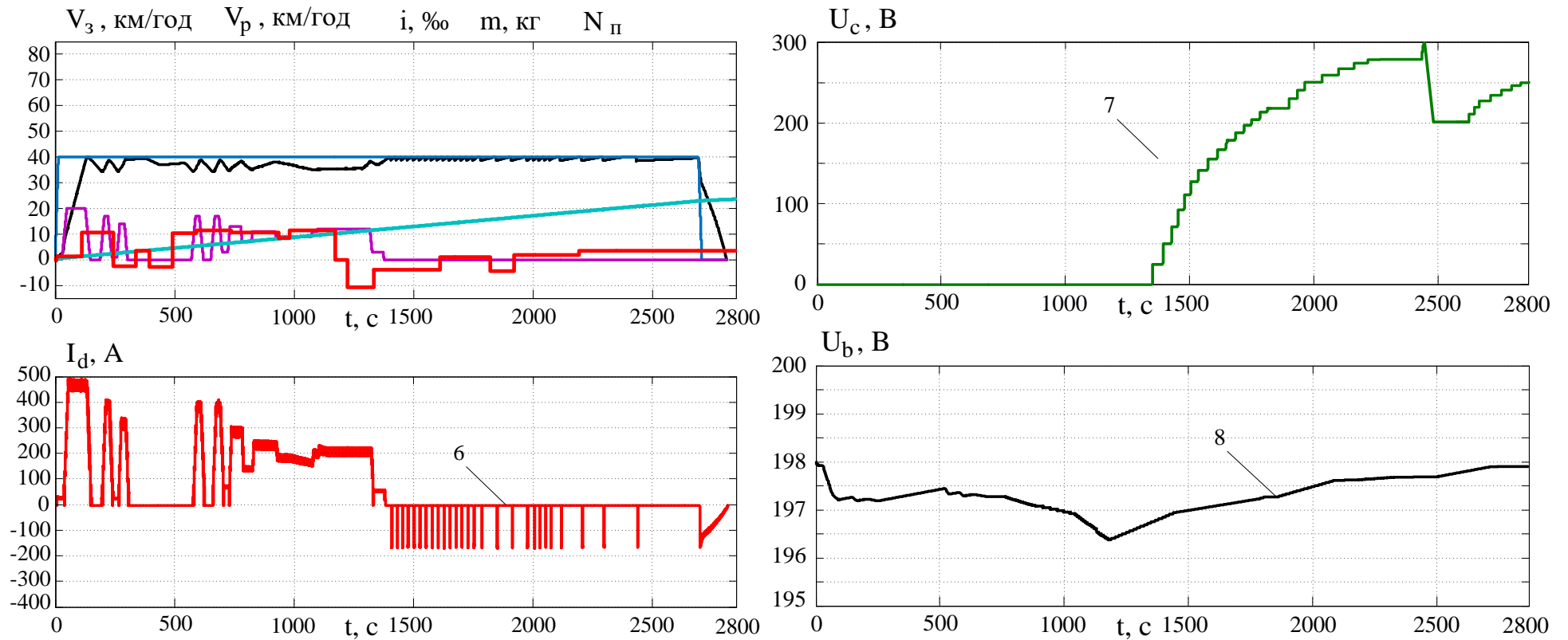


Рисунок 3.31 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ВІД при максимальній швидкості 40 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

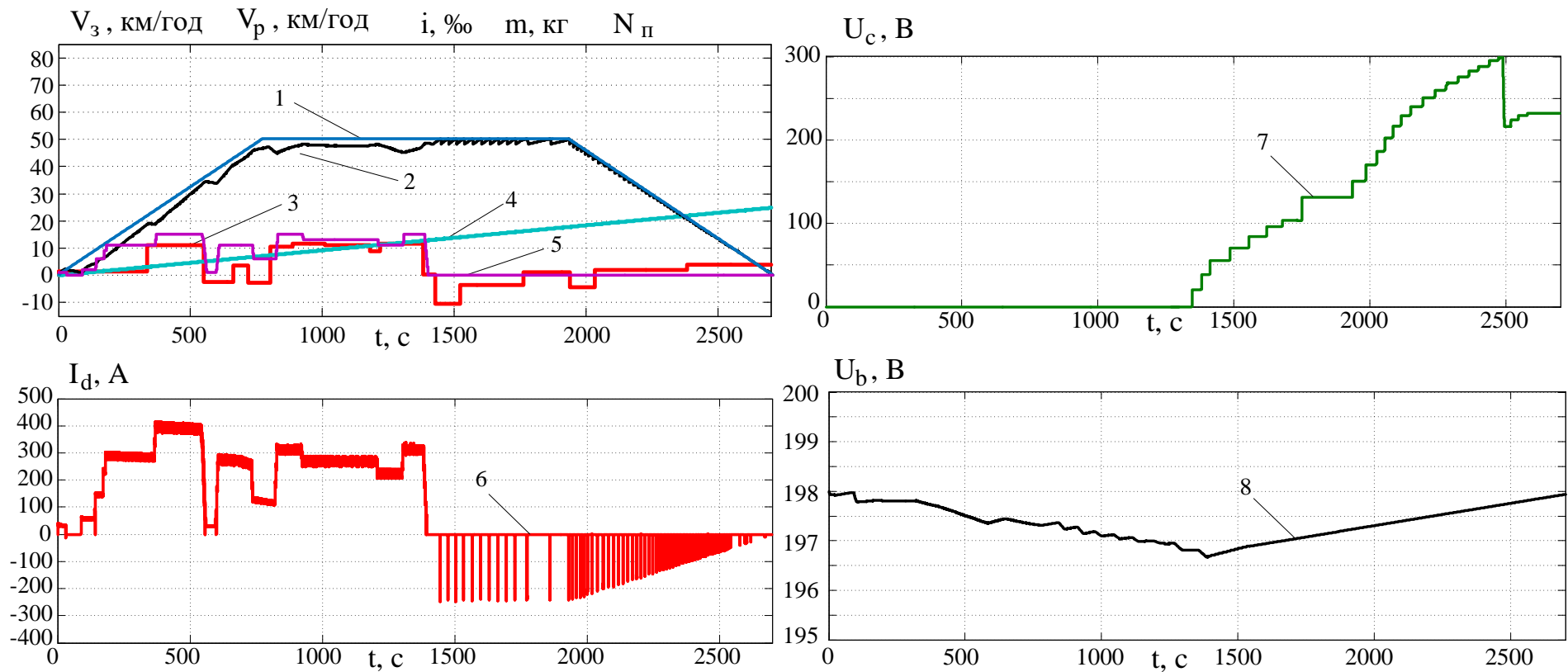


Рисунок 3.32 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ВІД при максимальній швидкості 50 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

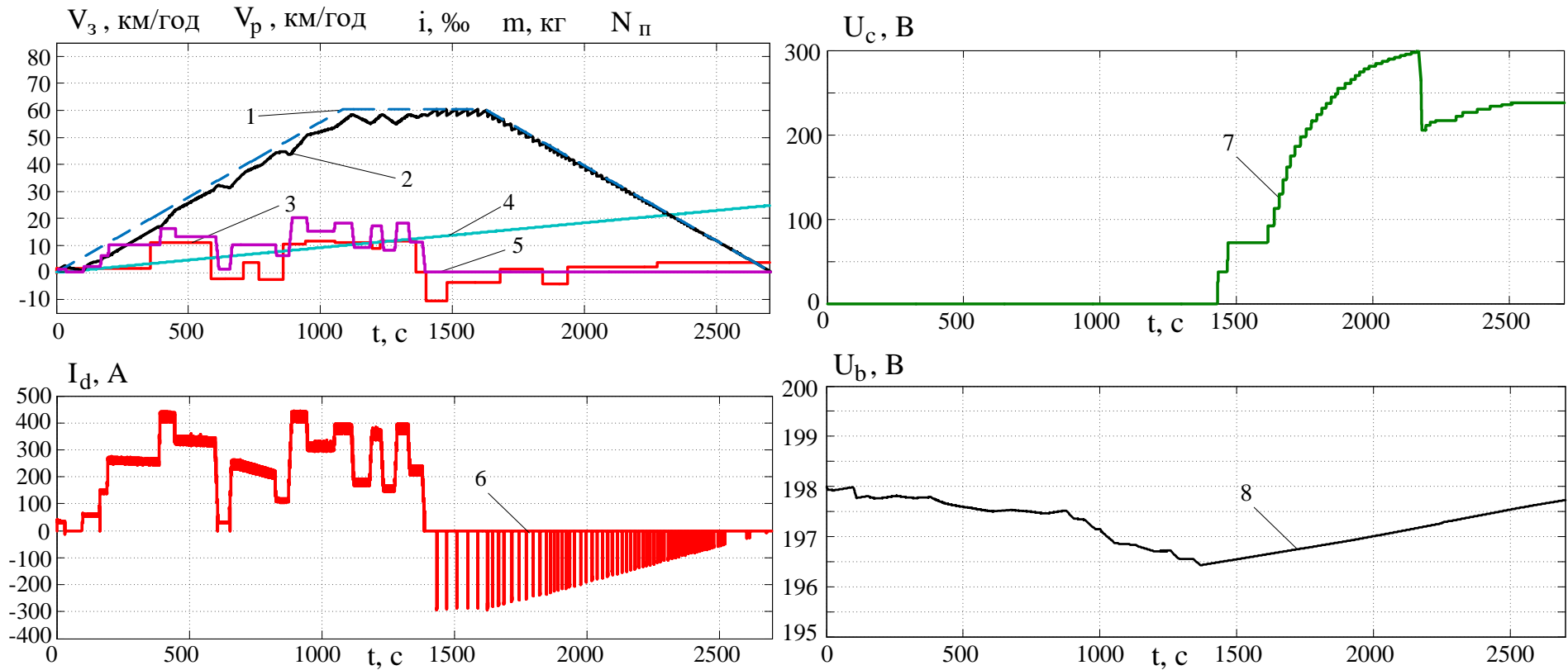


Рисунок 3.33 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ВІД при максимальній швидкості 60 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

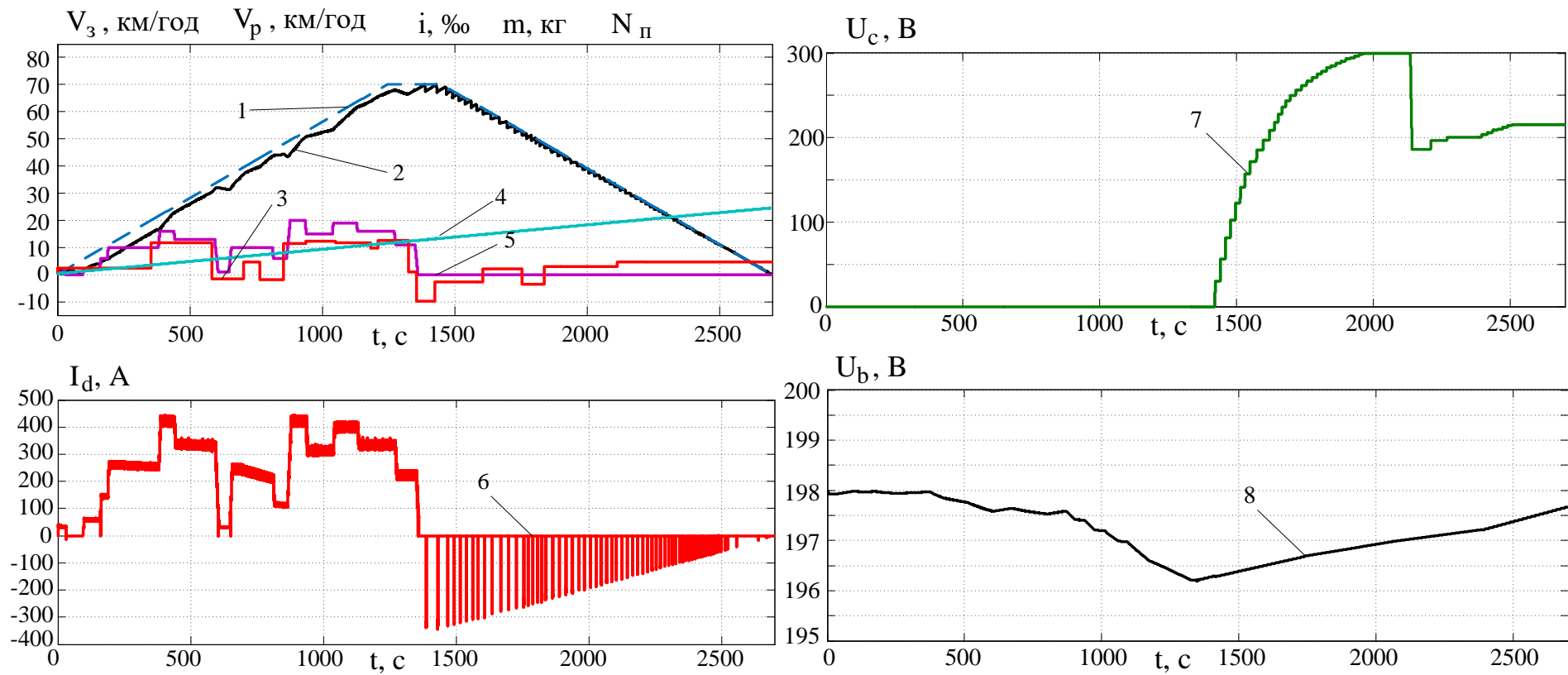


Рисунок 3.34 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ВІД при максимальній швидкості 70 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

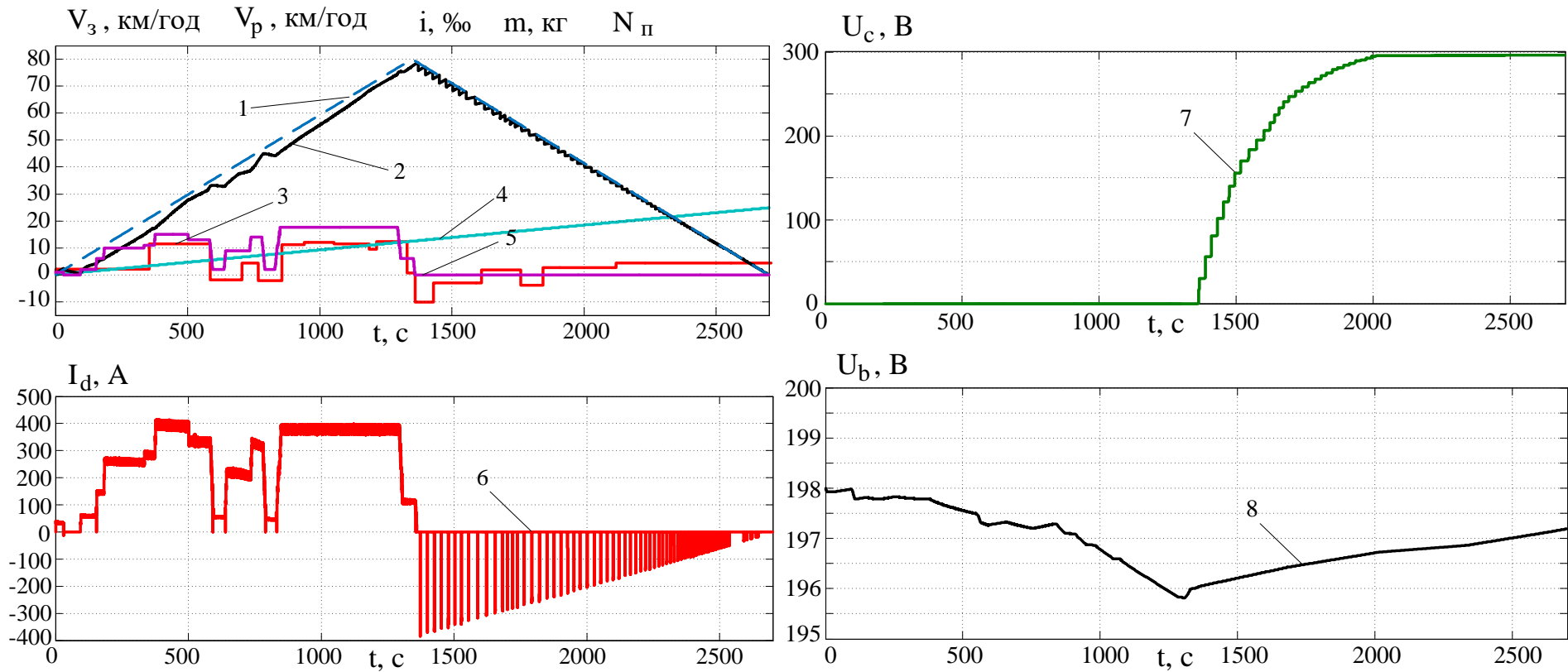


Рисунок 3.35 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ВІД при максимальній швидкості 80 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

Проаналізувавши отримані характеристики, результати були зведені у таблицю 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати моделювання

Максимальна швидкість трикутної тахограми, км/год	Максимальна швидкість руху потяга за тахограмою, км/год	Кількість витрат палива, кг	Величина напруги АБ, В	Величина напруги К, В
70	40	24,39	197,9	252
	50	24,41	198	235
	60	24,24	197,5	234
	70	24,43	197,8	292
75	40	24,36	197,9	251
	50	24,42	197,9	234
	60	24,37	197,6	237
	70	24,45	197,7	294
80	40	24,57	197,9	250
	50	24,53	197,8	231
	60	24,47	197,7	239
	70	24,32	197,6	215
	80	24,58	197,2	296
85	43	24,56	197,8	254
	50	24,89	197,5	233
	60	24,43	197,9	241
	70	24,54	197,5	221
	80	24,92	197,6	283
90	50	24,86	197,2	263
	60	24,62	197,5	240
	70	24,47	197,3	227
	80	24,87	196,8	287
95	50	24,41	197,2	268
	60	24,49	197,3	235
	70	24,44	197,1	229
	80	24,47	196,8	289

За результатами таблиці 3.7 були побудовані тривимірні залежності у вигляді поверхонь: витрати палива (рис. 3.36), величина напруги АБ (рис. 3.37), величина напруги К (рис. 3.38) від максимальної швидкості тахограми та часу руху перегоном.

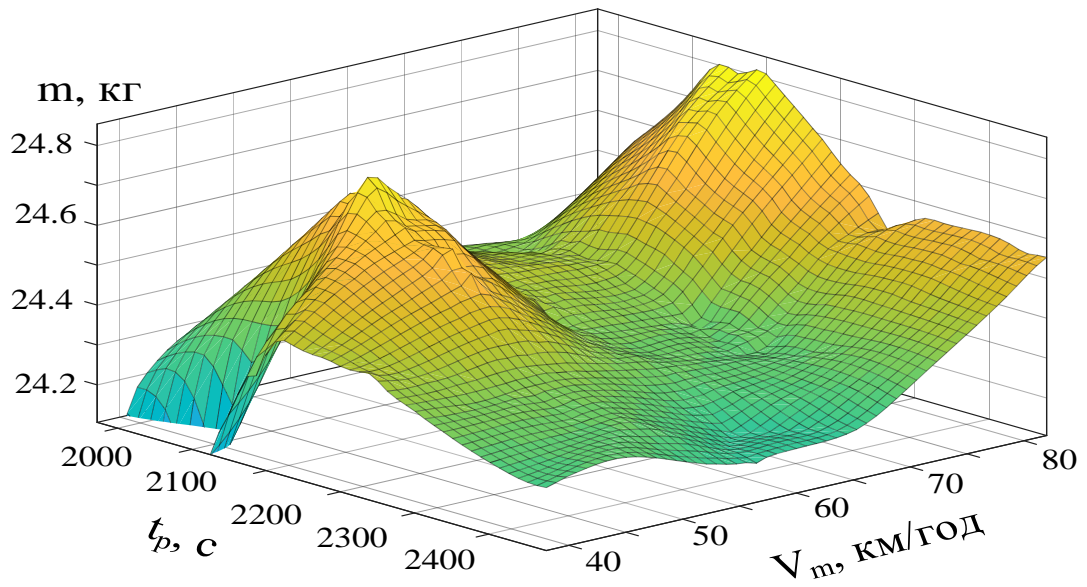


Рисунок 3.36 – Зміна витрат палива гібридним тепловозом з ВІД в залежності від максимальної швидкості та часу руху по перегону

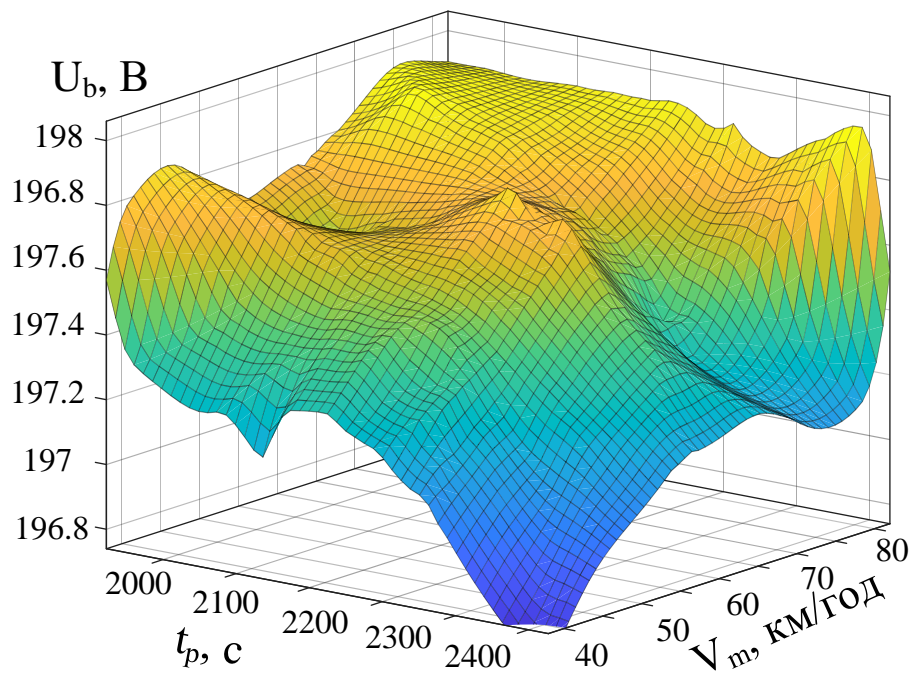


Рисунок 3.37 – Зміна напруги АБ в залежності від максимальної швидкості трикутної діаграми

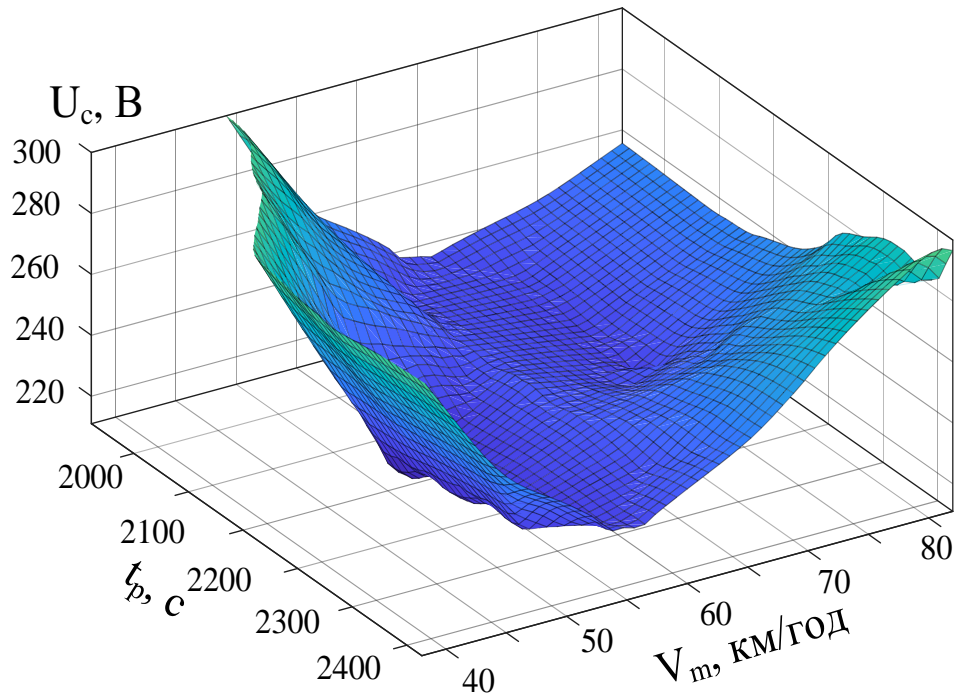


Рисунок 3.38 – Зміна напруги K в залежності від максимально швидкості трикутної діаграми

Аналіз отриманих поверхонь показує їх аналогію з залежностями, що спостерігались при використанні ДПС (рис. 3.17-3.19), але для ВІД у порівнянні з ДПС 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%.

Величини екстремумів при швидкостях 80 км/год та 50 км/год з максимальною швидкістю трикутної діаграми на рівні 85 км/год складають 24,92 та 24,89 кг відповідно.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Запропонована функціональна схема гібридного тепловозу, яка включає в себе дизель С18 ACERT, синхронний генератор ГС-500-400, акумулятор LT-LYP 770, конденсатор ИКЭ 40/96, тяговий двигун, в якості якого може застосовуватись ДПС послідовного збудження ТЕ-006 або ВІД ДВІ-165.

2. Виконано розрахунок та побудована діаграма роботи дизеля С18 ACERT.

3. Розроблено функціональні схеми накопичувачів енергії, а саме АБ та К. В основу роботи АБ покладені зарядно-розрядні характеристики, які були апроксимовані методом поліномів Чебишева.

4. Проведено ідентифікацію параметрів ВІД ДВІ-165 та отримано його математичну модель на основі рівнянь Лагранжа II роду. У результаті моделювання отримані осцилограми прямого пуску з обмеженням струму на рівні 600А.

5. Розроблено імітаційну модель роботи гібридного тепловоза з використанням реального профілю шляху ділянки Харків–Мерефа та основних рівнянь руху потягу. Така модель дозволяє використовувати в якості тягового як ДПС, так і ВІД. Були отримані осцилограми роботи тепловоза при різних тахограмах руху поїзда, а саме: швидкість потяга, профіль шляху, витрати палива, номер позиції контролера машиніста, струм ТЕД, напруга К та АБ.

6. Отримано поверхні, які відображають залежності витрат палива, напруг К та АБ від максимальної швидкості тахограми та часу руху перегонном для двох типів приводів. 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%. 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 витрати палива тепловозом за переходу К в режим заряду АБ.

7. 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.

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ШВИДКОСТІ

Розділ присвячений синтезу регуляторів швидкості та аналізу їх роботи з точки зору основних показників якості регулювання, а саме:

- аналіз існуючих типів регуляторів та вибір таких, що найбільш здатні враховувати особливості об'єкта керування;
- синтез модального регулятора швидкості;
- синтез нечіткого регулятора швидкості;
- розробка імітаційних моделей ВПП з синтезованими регуляторами швидкості та аналіз їх роботи з точки зору основних показників якості;
- розробка узагальненої імітаційної моделі роботи гібридного тепловозу з ВПП та регулятором швидкості, аналіз отриманих результатів.

4.1 Синтез модального регулятора швидкості

Так як ВІД характеризується істотними нелінійностями, то для синтезу регуляторів не прийнятні стандартні методи, що застосовуються для регуляторів лінійних об'єктів управління [49, 50, 51].

Аналіз літературних джерел показав, що для синтезу регуляторів ВІД застосовується лінеаризація магнітної системи [52]. Але такий підхід не забезпечує необхідну якість перехідних процесів при розгоні ВІД. З причини нелінійної структури ВІД метод налаштування коефіцієнтів регуляторів для лінеаризованої магнітної системи є неприйнятним. З урахуванням вищесказаного, знаходження та налаштування коефіцієнтів регуляторів проводилася з використанням раніше отриманої математичної моделі об'єкта регулювання [51, 53, 54].

Система керування ВПП являє собою систему підлеглого регулювання координат з можливістю використання традиційних та нетрадиційних регуляторів швидкості [55, 56, 57], таких як нечіткий (фазі) та модальний регулятори.

Фундаментальним поняттям в математичній теорії керування є простір станів. Зазвичай припускається, що система має n -й порядок, керується r -числом керуючих впливів u та має m вихідних координат y , які в загальному випадку можуть не бути координатами x руху електроприводу. Стан системи в будь-який момент часу t_0 , є така сукупність відомостей про неї, наявність яких разом з деяким керуючим впливом достатньо для прогнозування стану системи в будь-який момент часу t [58].

В цьому випадку, для опису системи доцільно використовувати апарат лінійної алгебри.

Тоді X є ні що інше, як вектор-стовпчик станів системи:

$$X = \begin{pmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \\ X_3(t) \\ \dots \\ X_n(t) \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

U – вектор-стовпчик керування:

$$U = \begin{pmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ U_3(t) \\ \dots \\ U_r(t) \end{pmatrix}, \quad (4.2)$$

Y – вектор-стовпчик виходів системи:

$$Y = \begin{pmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \\ Y_3(t) \\ \dots \\ Y_m(t) \end{pmatrix}, \quad (4.3)$$

У векторно-матричній формі будь-яку лінійну стаціонарну систему можна описати рівняннями:

$$\dot{X} = AX + BU, \quad (4.4)$$

$$Y = CX + DU, \quad (4.5)$$

де $A = \begin{vmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}$ – квадратна матриця власних значень розмірності $n \times n$;

$B = \begin{vmatrix} b_{11} & \dots & b_{1r} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nr} \end{vmatrix}$ – прямокутна матриця керування розмірності $n \times r$;

$C = \begin{vmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & \dots & c_{mn} \end{vmatrix}$ – прямокутна матриця коефіцієнтів виходу розмірності $m \times n$;

$D = \begin{vmatrix} d_{11} & \dots & d_{1r} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & \dots & d_{mr} \end{vmatrix}$ – матриця впливу керування на виході координати

розмірності $m \times r$.

Структурна схема багатомірної лінійної стаціонарної системи відповідно до рівняння 4.4 має вигляд:

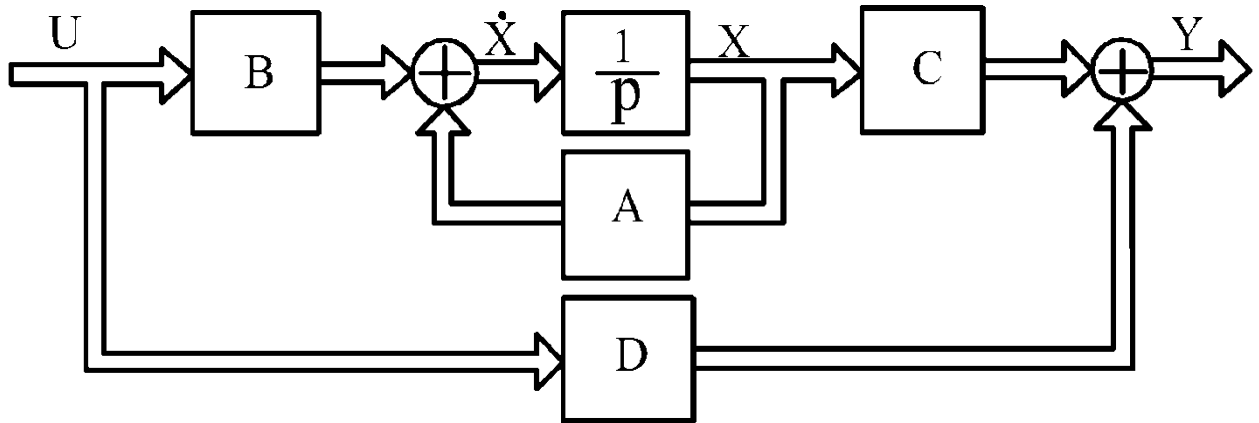


Рисунок 4.1 – Структурна схема багатомірної стаціонарної системи

Система що описується рівняннями 4.4, називається повністю керованою, якщо за допомогою обмеженого впливу U вона може бути переведена з довільного стану $x_0(t_0)$ у довільний кінцевий стан $x_1(t_1)$, при зміні часу $t_0 \leq t \leq t_1$. Умовою керованості є:

$$\text{Rang}P = n, \quad (4.6)$$

де n – порядок системи;

P – матриця керованості розмірності $n \times m$: $P = |B, BA, BA^2, \dots, BA^{n-1}|$.

Якщо виконується умова 4.6, можливе створення модального регулятора у відповідності до структурної схеми рисунок 4.2.

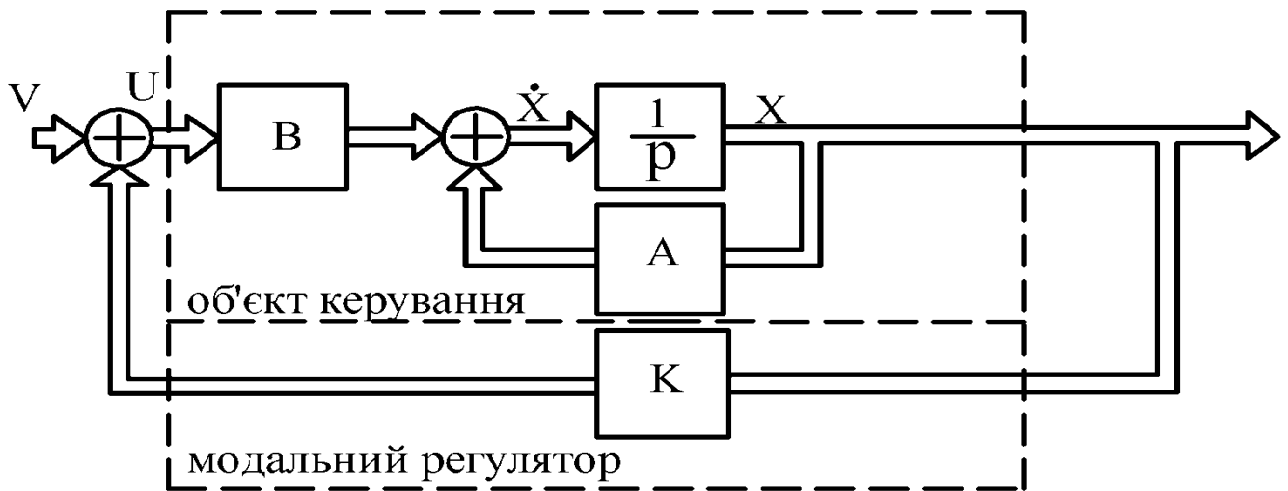


Рисунок 4.2 – Структурна схема замкненої багатомірної системи з модальним регулятором

В даному випадку замкнена система керування буде описуватись наступними рівняннями:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ U = V - KX \end{cases}, \quad (4.7)$$

де U – матриця керування,

V – матриця завдання,

K – матриця-строчка зворотного зв'язку, що складається з коефіцієнтів зворотного зв'язку за вектором стану X .

Вирішуючи рівняння отримаємо:

$$\dot{X} = AX + BV - KBX = (A - KB)X + BV = \tilde{A}X + BV, \quad (4.8)$$

де $\tilde{A} = A - KB$.

Модальний регулятор є безінерційним регулятором. Він встановлюється в ланцюгу зворотного зв'язку. На його вході здійснюється алгебраїчне складання всіх зворотних зв'язків по вектору стану [59].

Для визначення коефіцієнтів модального регулятора необхідно знайти характеристичне рівняння замкненої системи:

$$F_0 = \det(pI - \tilde{A}), \quad (4.9)$$

де $I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$ – одинична матриця.

Після цього необхідно прирівняти коефіцієнти рівняння коефіцієнтам фільтра Баттерворта при відповідних степенях p .

Фільтри Баттерворта для систем 2-го – 4-го порядку мають вигляд:

$$p^2 + 1,41\omega_0 p + \omega_0^2, (n=2), \quad (4.10)$$

$$p^3 + 2\omega_0 p^2 + 2\omega_0^2 p + \omega_0^3, (n=3), \quad (4.11)$$

$$p^4 + 2,6\omega_0 p^3 + 3,41\omega_0^2 p^2 + 2,6\omega_0^3 p + \omega_0^4, (n=4), \quad (4.12)$$

де ω_0 – власна частота коливання системи, що параметром, який довільно задається, від якого залежить якість перехідного процесу.

Для розробки методики розрахунку коефіцієнтів регулятора, з метою подальшого її застосування для ВІП, їх визначення буде ґрунтуватись на системі з двигуном постійного струму послідовного збудження [60].

Для визначення коефіцієнтів матриць A і B необхідно скористуватись структурною схемою системи тиристорний перетворювач – двигун:

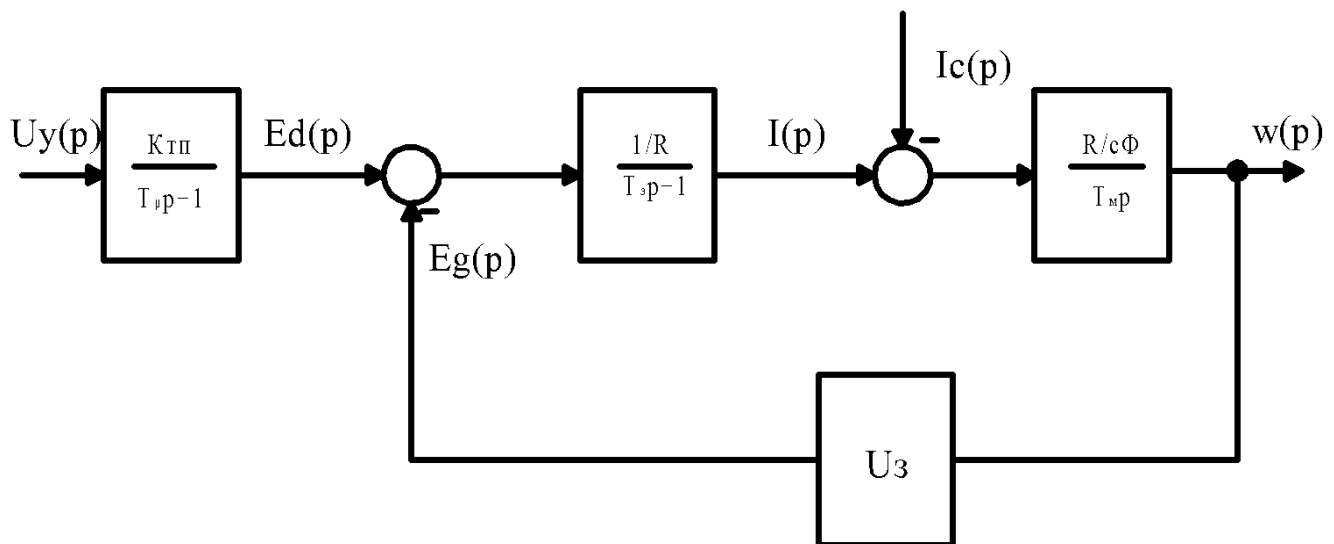


Рисунок 4.3 – Структурна схема силової частини електроприводу постійного струму

За структурною схемою запишемо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{E_d}{U_y} = \frac{K_{III}}{T_\mu p + 1} \\ \frac{1}{E_d - c\omega\Phi_H} = \frac{1/R_e}{T_e p + 1} \\ \frac{\omega}{I} = \frac{R_e/c\Phi_H}{T_M p} \end{array} \right. \quad (4.13)$$

Позначимо:

$$\dot{X}_1 = \frac{d\omega}{dt}, \quad x_1 = \omega, \quad \dot{X}_2 = \frac{dI}{dt}, \quad x_2 = I, \quad \dot{X}_3 = \frac{dE_d}{dt}, \quad x_3 = E_d.$$

Після вирішення системи рівнянь відносно \dot{X}_1 , \dot{X}_2 та \dot{X}_3 отримаємо:

$$\dot{X}_1 = 0 + \frac{R_e}{T_M c\Phi_H} X_2 + 0 + 0, \quad (4.14)$$

$$\dot{X}_2 = -\frac{c\Phi_H}{R_e T_e} x_1 - \frac{1}{T_e} x_2 + \frac{1}{R_e T_e} x_3 + 0, \quad (4.15)$$

$$\dot{X}_3 = 0 + 0 - \frac{1}{T_\mu} x_3 + \frac{K_{III}}{T_\mu} U_y. \quad (4.16)$$

Таким чином, з коефіцієнтів при x_1 , x_2 , x_3 складається матриця A , а з коефіцієнтів при керуючих впливах – матриця B .

Тоді для матриці власних значень A отримаємо:

$$A = \begin{vmatrix} 0 & \frac{R_e}{T_M c\Phi_H} & 0 \\ \frac{c\Phi_H}{R_e T_e} & -\frac{1}{T_e} & \frac{1}{R_e T_e} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_\mu} \end{vmatrix}. \quad (4.17)$$

Матриця керування B має вигляд:

$$B = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{III}}{T_\mu} \end{vmatrix}. \quad (4.18)$$

Для визначення коефіцієнтів зворотного зв'язку регулятора знайдемо характеристичне рівняння:

$$\det(pI - A + BK) = p \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & \frac{R_e}{T_M c \Phi_H} & 0 \\ \frac{c \Phi_H}{R_e T_e} & -\frac{1}{T_e} & \frac{1}{R_e T_e} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_\mu} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{ТП}}{T_\mu} \end{vmatrix} \cdot |\kappa_0 \quad \kappa_1 \quad \kappa_2| =$$

$$= p^3 + \left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T_\mu} + \frac{K_{ТП}}{T_\mu} \kappa_2 \right) \cdot p^2 + \left(\frac{(c \Phi_H)^2}{J R_e T_e} + \frac{1}{T_e T_\mu} + \frac{K_{ТП} \kappa_2}{T_\mu} + \frac{K_{ТП} \kappa_1}{R_e T_e T_\mu} \right) \cdot p +$$

$$+ \left(\frac{(c \Phi_H)^2}{J R_e T_e T_\mu} + \frac{K_{ТП} (c \Phi_H)^2 \cdot \kappa_2}{J R_e T_e T_\mu} + \frac{K_{ТП} c \Phi_H \cdot \kappa_0}{J R_e T_e T_\mu} \right),$$

де κ_0 – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю;

κ_1 – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом;

κ_2 – коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою тиристорного перетворювача.

Фільтр Баттерворта для системи 3го порядку має вигляд (4.11).

Порівнюючи коефіцієнти при відповідних степенях p , за якими можуть бути розраховані їх чисельні значення, якщо попередньо задатися величиною ω_0 :

$$\kappa_2 = \left(-\frac{1}{T_\mu} - \frac{1}{T_e} - 2\omega_0 \right) \frac{T_\mu}{K_{ТП}}, \quad (4.19)$$

$$\kappa_1 = \left(-\frac{1}{T_M T_e} - \frac{\kappa_{ТП} \kappa_2}{T_\mu T_M T_\omega} - 2\omega_0^2 \right) \frac{R_e T_e T_\mu}{K_{ТП}}, \quad (4.20)$$

$$\kappa_0 = \left(-\frac{1}{T_\mu T_M T_e} - \frac{\kappa_{ТП} \kappa_2}{T_\mu T_M T_e} - 2\omega_0^3 \right) \frac{T_\mu T_M T_e c \Phi_H}{K_{ТП}}. \quad (4.21)$$

Власну частоту коливань ω_0 вибирають довільно. Для спрощення розрахунків коефіцієнтів ω_0 можна прийняти рівною $\frac{1}{2T_{\mu TP}} \leq \omega_0 \leq \frac{1}{T_{\mu TP}}$.

Структурна схема системи модального керування наведена на рисунку 4.4.

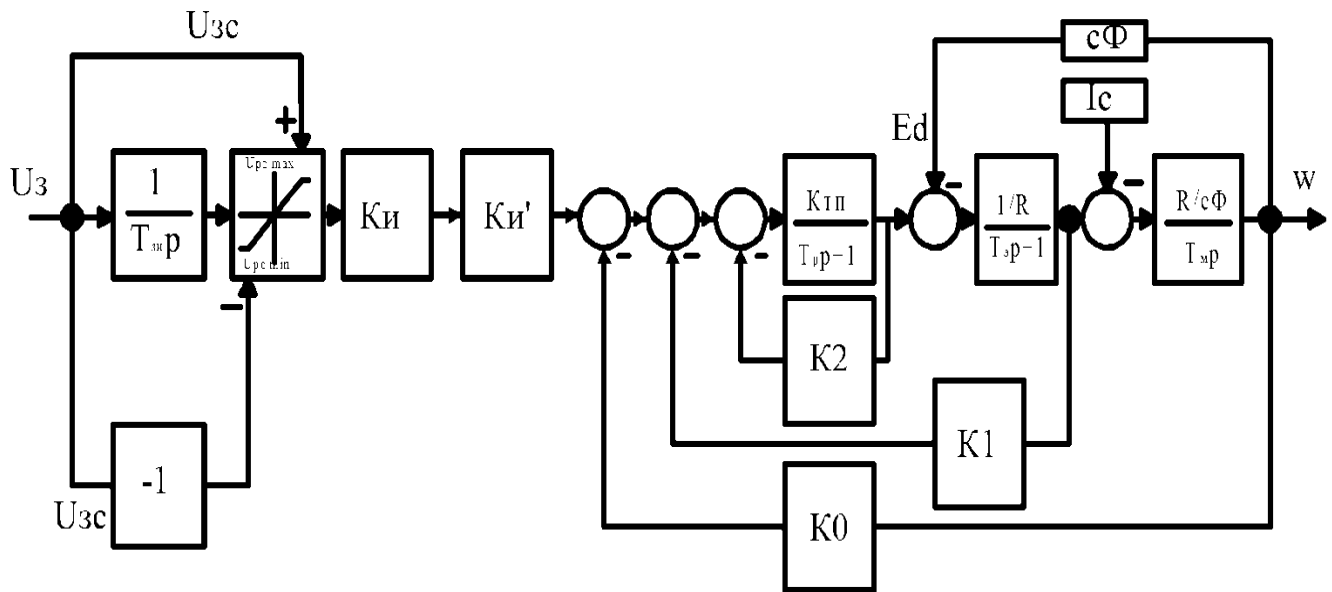


Рисунок 4.4 – Структурна схема електроприводу з модальним регулятором

Розрахунок коефіцієнта підсилення за ланцюгом завдання k_3 проводиться відповідно наступних міркувань. Відомо, що якість перехідних процесів визначається замкненою частиною системи керування. На кількісні показники, тобто сталі значення вихідних координат, впливає коефіцієнт підсилення прямого ланцюга [61].

Коефіцієнт підсилення замкненої системи за керуючим впливом k_3 можна визначити методом графів або методом лінійної ТАК. Він розраховується за залежністю:

$$k_3 = \left(K_{ТП} k_2 + 1 + \frac{K_{ТП} K_0}{c\Phi_H} \right) \frac{c\Phi_H}{K_{ТП}}. \quad (4.22)$$

Розрахунок модального регулятора для ВІД проводиться по аналогії з розрахунком для двигуна постійного струму враховуючи що рівняння напруги для вентильно-індукторного двигуна має вигляд:

$$U = IR + \frac{d\psi(\theta, i)}{dt}. \quad (4.23)$$

Складову $\frac{d\psi(\theta, i)}{dt}$ представляємо у вигляді частинних похідних:

$$\frac{d\psi(\theta, i)}{dt} = \frac{\partial \psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt}, \quad (4.24)$$

тому формула 6.1 приймає вигляд:

$$U = IR + \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} + \frac{\partial \Psi}{\partial i} \frac{di}{dt}, \quad (4.25)$$

в той час, для двигуна постійного струму рівняння напруги має вигляд:

$$U = IR + k\Phi \omega + L \frac{di}{dt}. \quad (4.26)$$

Виходячи з рівнянь (4.25) та (2.26), можна зробити висновок, що для вентильно-індукторного двигуна аналогом $k\Phi$ є $\frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial \theta}$, а L представляє собою $\frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial i}$, які, в свою чергу, є змінними величинами.

Залежності частинних похідних потокозчеплення можна побудувати у вигляді тривимірних поверхонь, що зображені на рисунках 4.5 та 4.6.

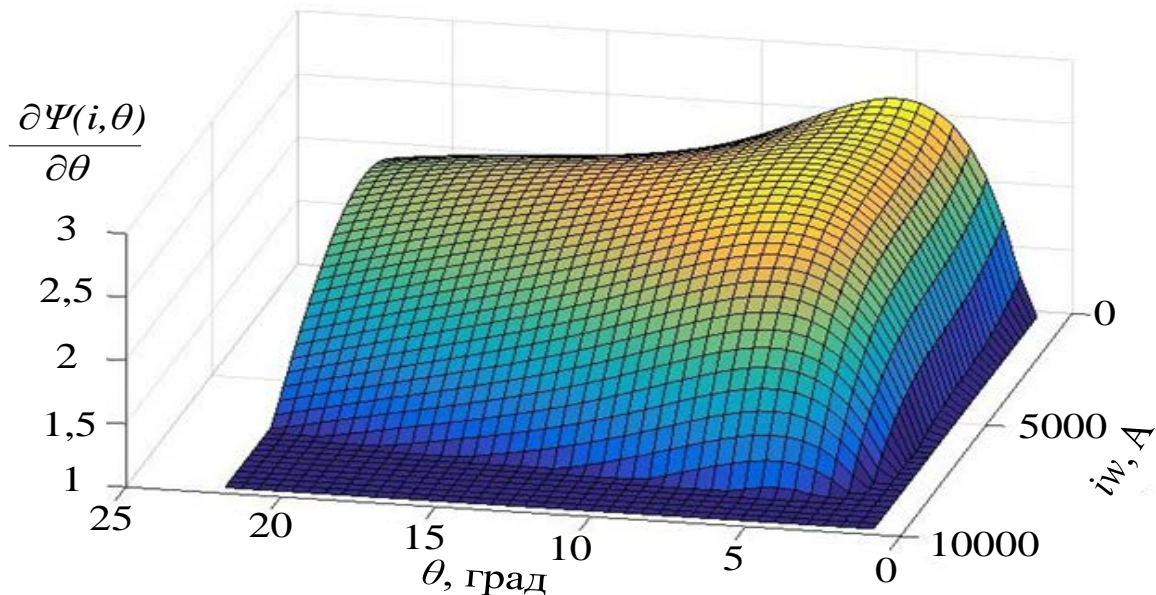


Рисунок 4.5 – Залежність частинної похідної потокозчеплення від кута повороту ротора ВІД

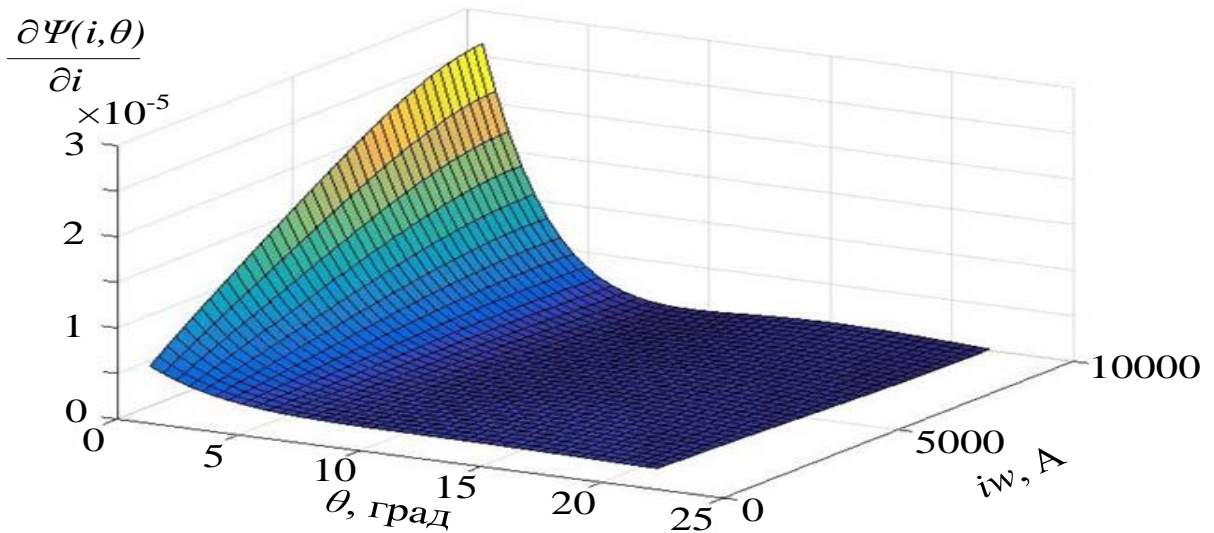


Рисунок 4.6 – Графік часткової похідної потокозчеплення від струму

З розрахованих значень частинних похідних розраховуємо значення електромагнітної та електромеханічної сталих часу за формулами (4.27) та (4.28).

$$T_e = \frac{\frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial i}}{R}; \quad (4.27)$$

$$T_M = \frac{J \cdot R}{\frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial i}}. \quad (4.28)$$

Результати розрахунку сталих часу наведені у вигляді тривимірних поверхонь, що представлені на рисунках 4.7 та 4.8.

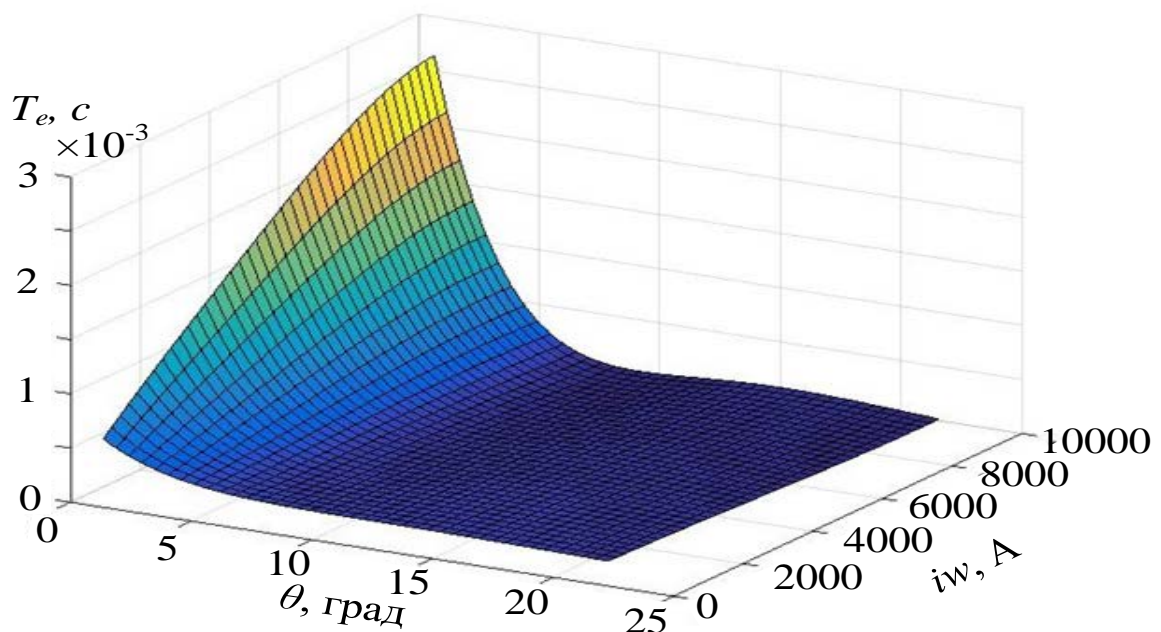


Рисунок 4.7 – Поверхня, що відображає зміну електромагнітної сталої часу

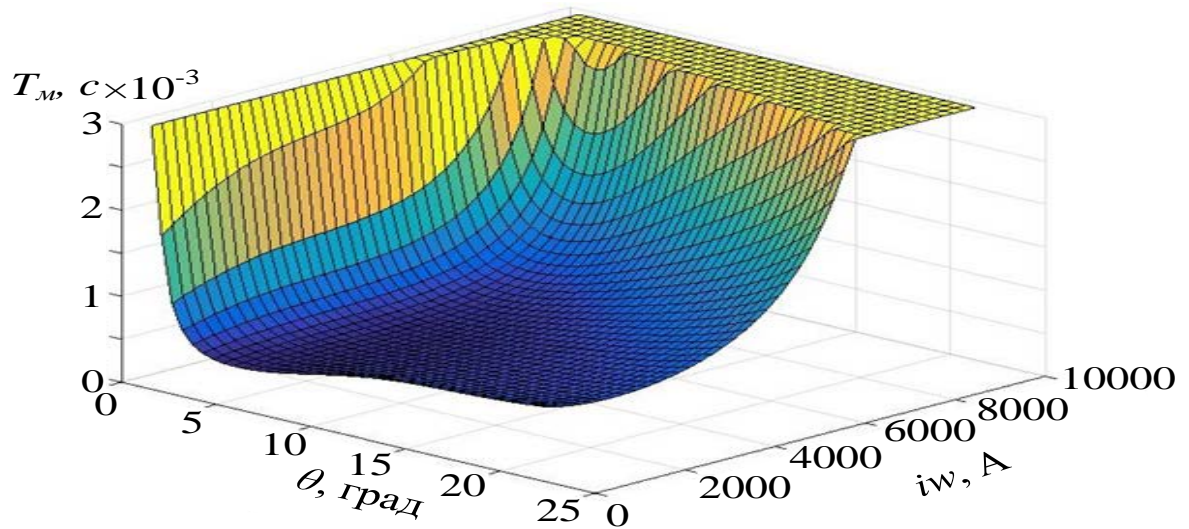


Рисунок 4.8 – Поверхня, що відображає зміну електромеханічної сталої часу

За розрахованими параметрами, використовуючи формули (4.20), (4.21) та (4.22) отримуємо поверхні які відображають зміну коефіцієнтів зворотних зв'язків модального регулятора, що наведені на рисунках 4.9, 4.10 та 4.11 відповідно.

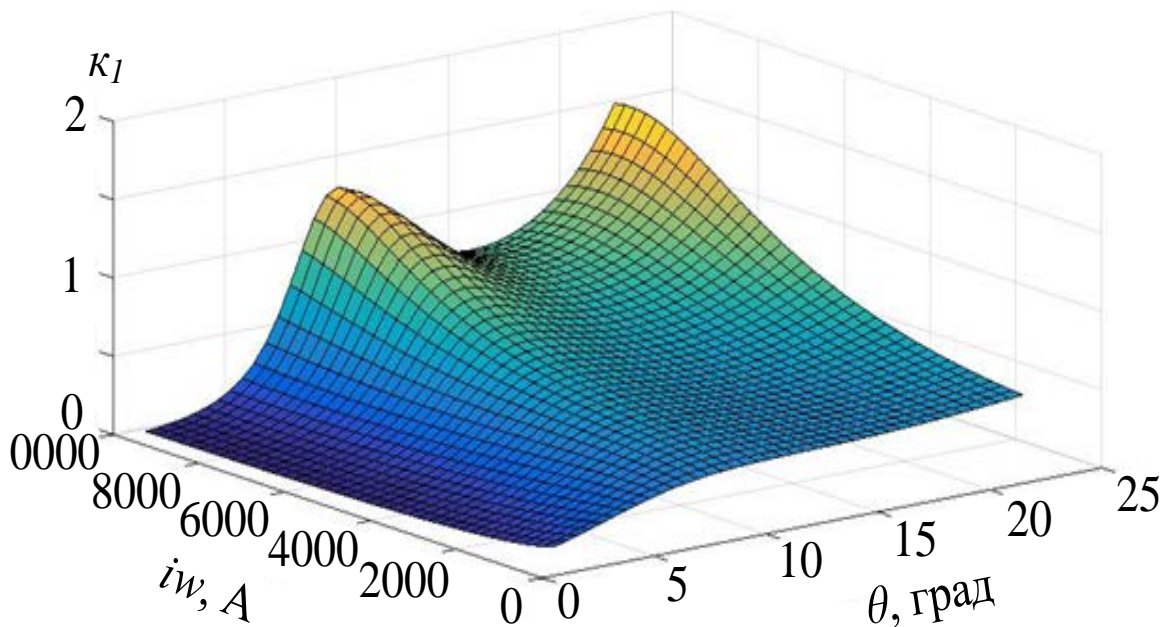


Рисунок 4.9 – Поверхня яка відображає зміну коефіцієнта зворотного зв'язку регулятора за напругою

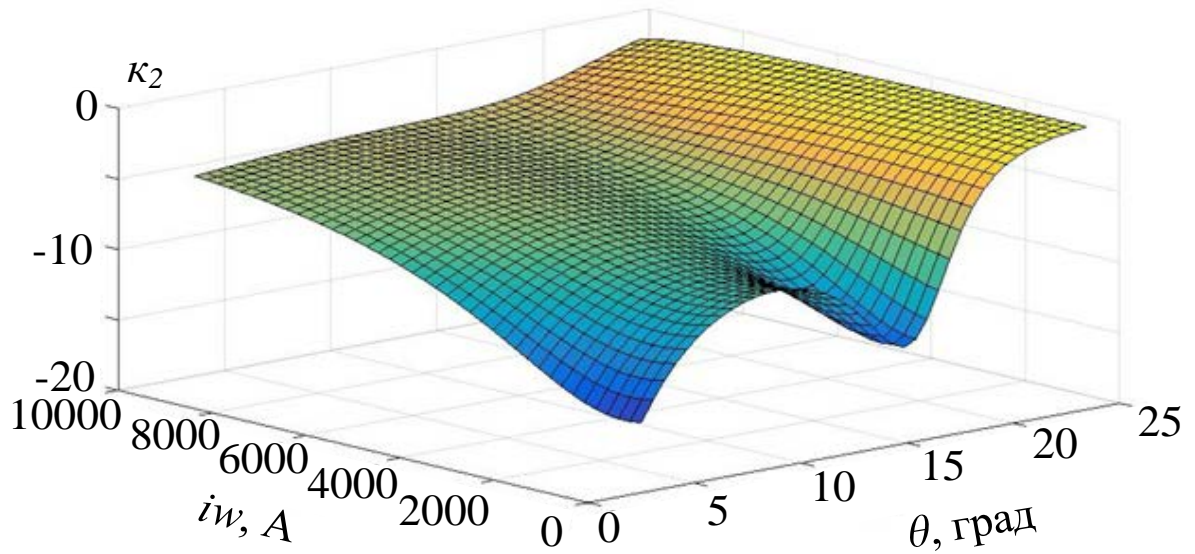


Рисунок 4.10 – Поверхня яка відображає зміну коефіцієнта зворотного зв'язку регулятора за струмом

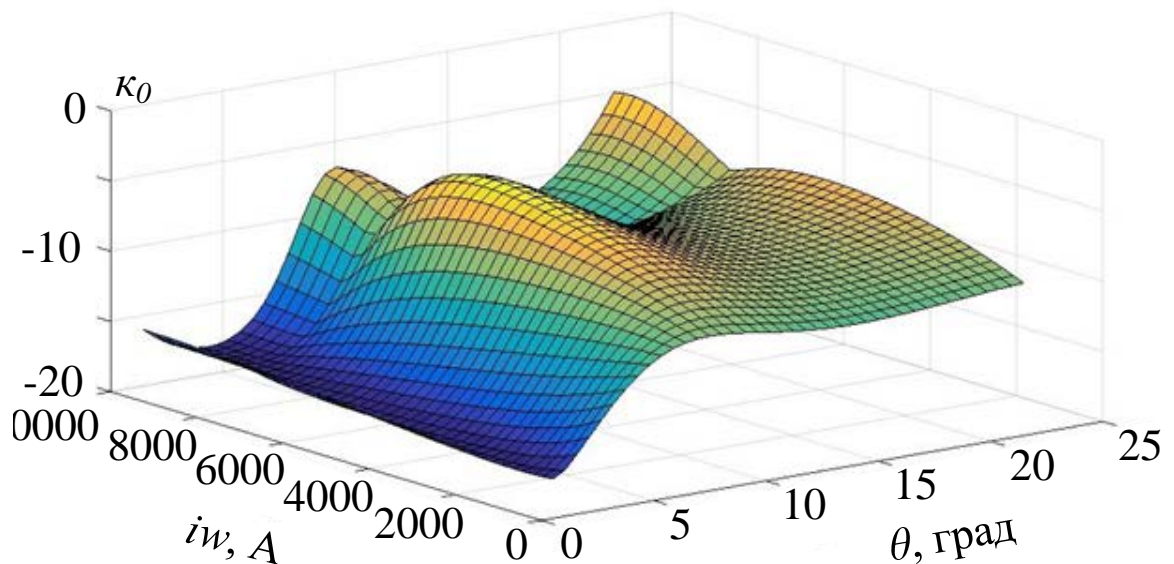


Рисунок 4.11 – Поверхня яка відображає зміну коефіцієнта зворотного зв'язку регулятора за швидкістю

Використовуючи розраховані поверхні, була розроблена структурна схема ВІП з модальним керуванням (рисунок 4.12), на основі якої складена імітаційна модель.

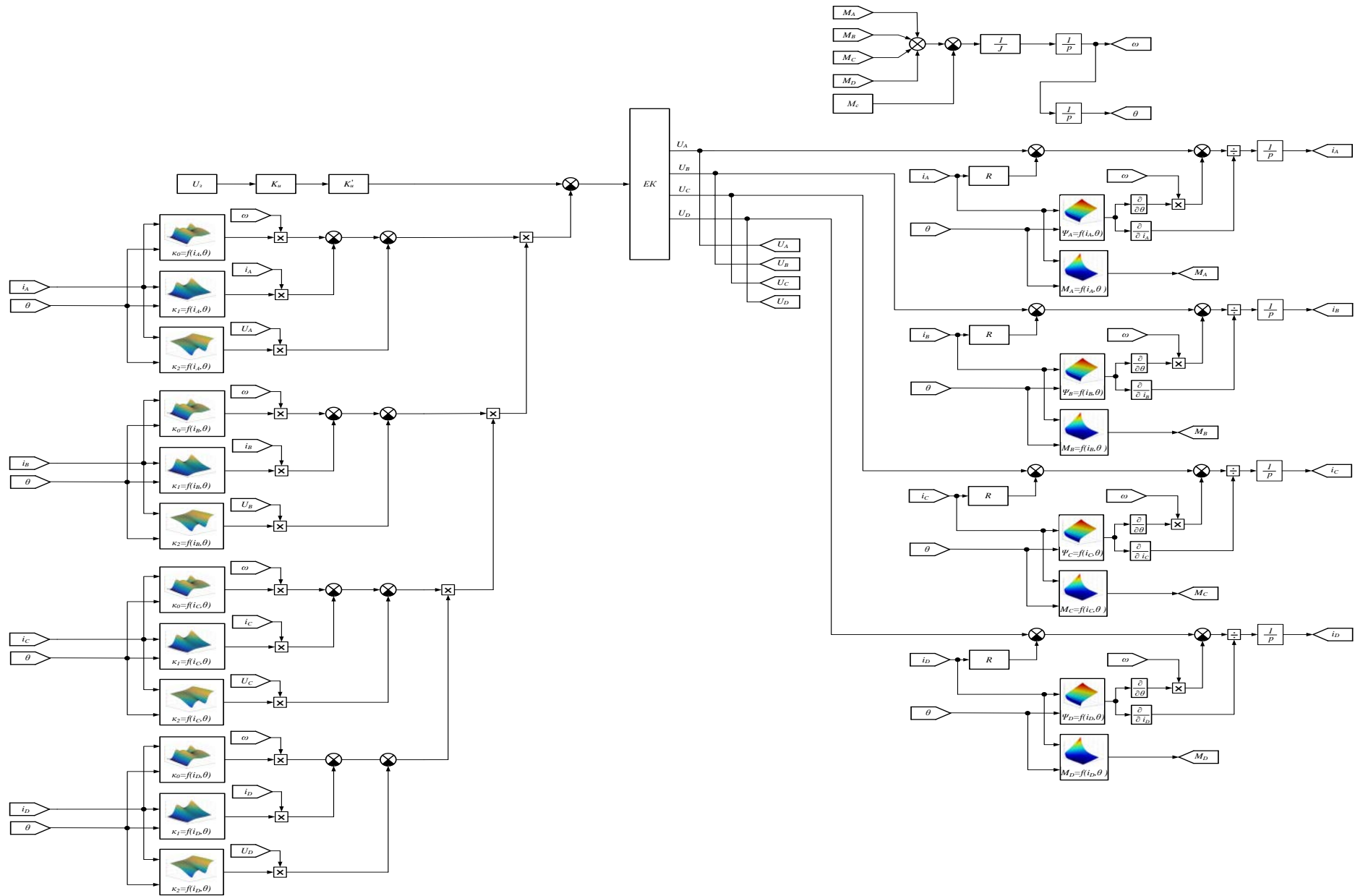


Рисунок 4.12 – Структурна схема ВІП з модальним керуванням

Осцилограми швидкості та струму вентиляно-індукторного двигуна с модальним регулятором зображені на рисунках 4.13 та 4.14.

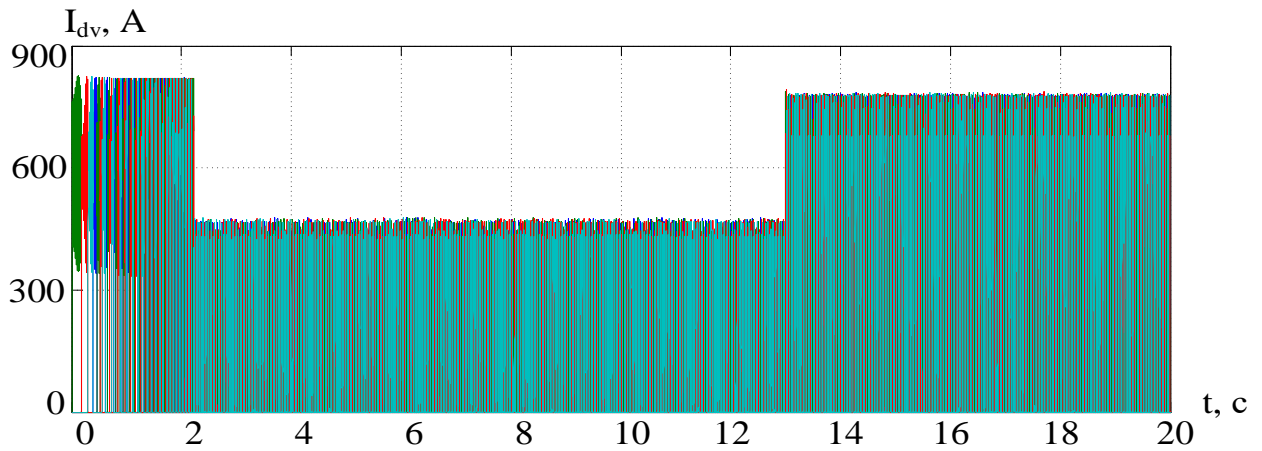


Рисунок 4.13 – Осцилограма струму двигуна при роботі ВІП з модальним регулятором

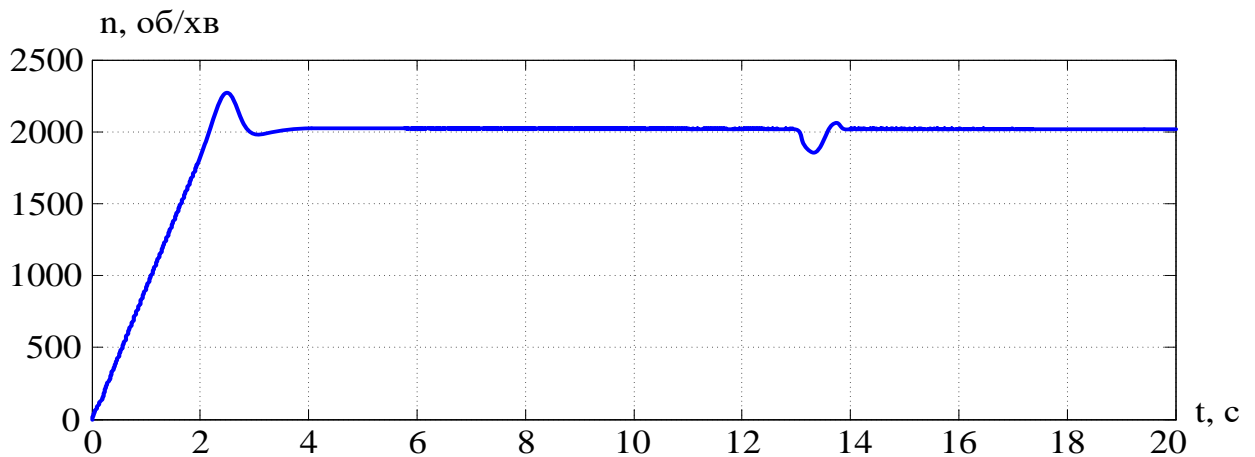


Рисунок 4.14 – Осцилограма швидкості при роботі ВІП з модальним регулятором

З отриманих осцилограм видно, що при роботі ВІД з модальним регулятором пере регулювання швидкості склало 7,8%, час регулювання дорівнював 3,21 с. Найбільші значення фазних струмів двигуна склали 830 А.

4.2 Синтез нечіткого регулятора швидкості ВІП

Синтез нечіткого регулятора виконувався на базі ПІД-регулятора [62]. Близько 90–95% регуляторів, що знаходяться зараз в експлуатації, використовують ПІД-алгоритм [63, 64, 65]. Причинами такої високої популярності є простота побудови і промислового використання, ясність

функціонування, придатність для вирішення більшості практичних завдань і низька вартість. Передаточна функція, а також сигнал на виході ПІД-регулятора можуть бути представлені як

$$W_p(p) = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p, \quad (4.29)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (4.30)$$

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 [66, 67]

$$\begin{aligned} u[n] = K_p e[n] + K_i (u[n-1] + T_0 e[n]) + \frac{K_d}{T_0} (e[n] - e[n-1]) = \\ K_p e[n] + K_i T_0 e[n] + \frac{K_d}{T_0} (e[n] - e[n-1]) + K_i u[n-1]. \end{aligned} \quad (4.31)$$

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

Використовуючи вирази (4.31) побудована структурна схема ПІД-регулятора, яка представлена на рис. 4.15.

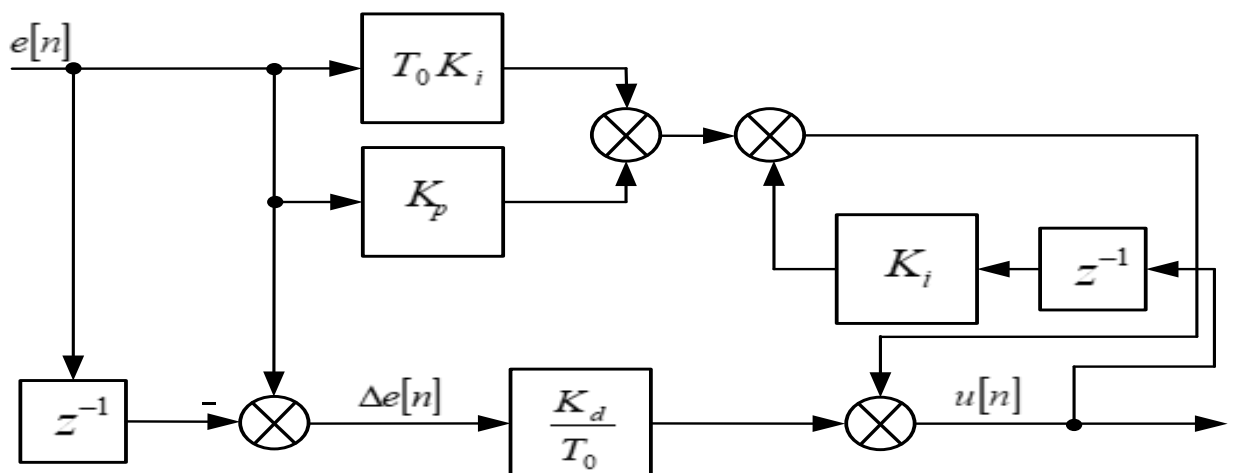


Рисунок 4.15 – Структура дискретного ПІД-регулятора

В якості методів знаходження коефіцієнтів ПДД-регулятора було обрано метод – Чина-Хронса-Ресвіка (CHR0%, CHR20%) [68, 69]. На відміну, наприклад, від метода Зиглера-Нікольса, який використовує як критерій якості налаштування декремент згасання рівний 4, Чин, Хронс і Ресвік використали критерій максимальної швидкості наростання за відсутності перерегулювання (CHR0%) або за наявності не більше ніж 20% перерегулювання (CHR20%). Такий критерій дозволяє отримати більший запас стійкості ніж в методі Зиглера-Нікольса [70, 71, 72].

Для розрахунку коефіцієнтів ПДД-регулятора використовується реакція об'єкту управління на ступінчасту дію [71, 73, 74]. Об'єкти управління, що мають аперіодичну криву розгону, як на рис. 4.16, апроксимуються послідовним з'єднанням аперіодичної ланки та ланки запізнення.

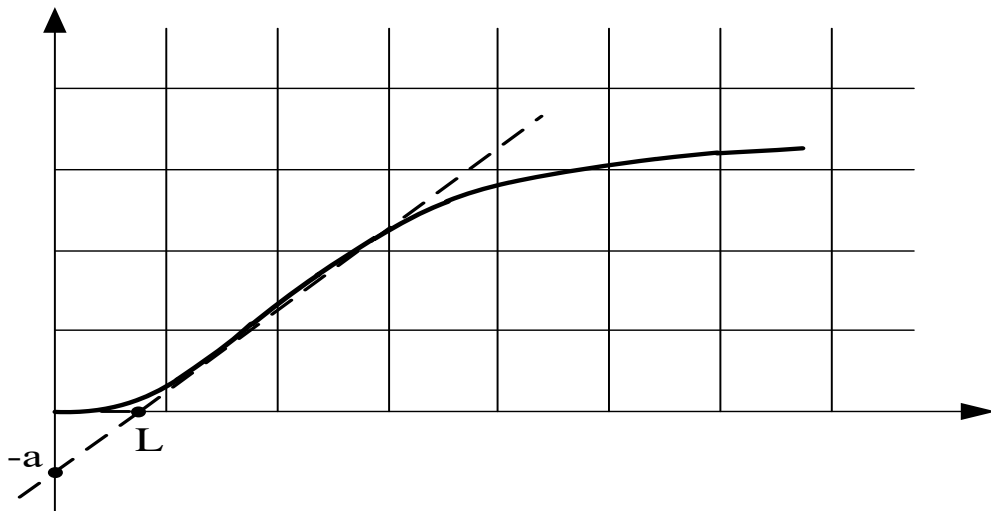


Рисунок 4.16 – Приклад кривої розгону об'єкта управління

При розрахунку регуляторів, як без перерегулювання (CHR0%), так і з 20% перерегулюванням (CHR20%), використовуються всього два параметри: a та L . Формули для розрахунку коефіцієнтів приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Розрахунок параметрів ПІД-регулятора без перерегулювання та з 20% перерегулюванням

Метод	K_p	K_i	K_d
CHR0%	$\frac{0,6}{a}$	$\frac{L}{K_p}$	$\frac{0,5L}{K_p}$
CHR20%	$\frac{0,95}{a}$	$\frac{1,4L}{K_p}$	$\frac{0,47L}{K_p}$

Обчислення параметрів за формулами не може дати оптимального налаштування регулятора, оскільки аналітично отримані результати ґрунтуються на сильно спрощених моделях об'єкту [75, 76]. Підлаштування можна виконати на основі правил, які використовуються для ручного налаштування. Ці правила отримані з досвіду, теоретичного аналізу і чисельних експериментів. Вони зводяться до наступного: збільшення пропорційного коефіцієнта збільшує швидкодію і знижує запас стійкості; зі зменшенням інтегральної складової помилка регулювання з часом зменшується швидше; зменшення постійної інтеграції зменшує запас стійкості; збільшення диференціальної складової збільшує запас стійкості і швидкодію [77, 78].

Регулятор швидкості, описаний вище, має недостатньо високі показники якості при управлінні нелінійними і складними системами. Характеристики регуляторів в деяких випадках можна поліпшити за допомогою нечіткої логіки.

Під нечітким керуванням (Fuzzy Control) [79, 80, 81, 82] розуміється область застосування змін загальної методології теорії нечітких множин і нечіткої логіки для вирішення практичних завдань управління. У свою чергу нечітка логіка є узагальненням класичної логіки і теорії множин. Нечітке управління виникло як технологія, здатна розширити можливості автоматизації виробництва і призначена для вирішення прикладних завдань в

галузі управління, які в загальному випадку можуть бути реалізованих за допомогою програмованих контролерів [83, 84].

На відміну від традиційної математики, що вимагає на кожному кроці моделювання точних і однозначних формулювань закономірностей, нечітка логіка пропонує зовсім інший рівень мислення, завдяки якому творчий процес моделювання відбувається на найвищому рівні абстракції, при якому постулюється лише мінімальний набір закономірностей [85, 86, 87]. Нечітка логіка є одним з найбільш перспективних напрямків сучасної теорії управління.

В основі фазі логіки лежить теорія нечітких множин, де функція приналежності елемента множини не бінарні, а може приймати будь-яке значення в діапазоні 0-1. Така логіка дає можливість будувати системи, які здатні обробляти неточну інформацію, дозволяючи при цьому виконувати над такими величинами весь спектр логічних операцій: поєднання (рис.4.17 а), перетин (рис.4.17 б), заперечення (рис.4.17 в) та ін. [86, 88, 89].

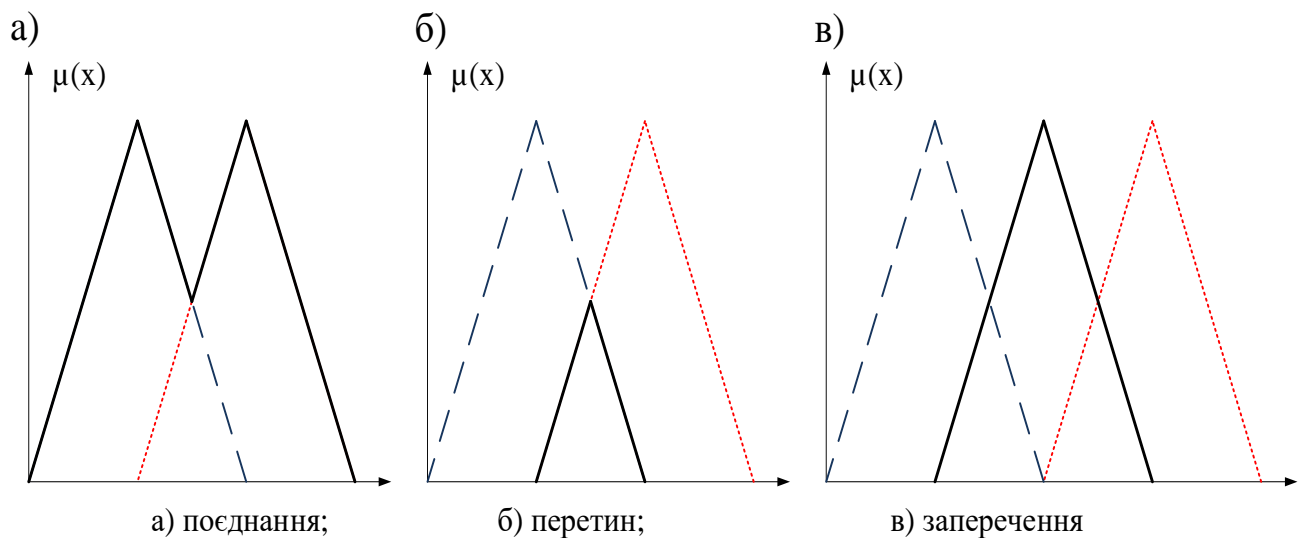


Рисунок 4.17 – Основні операції з нечіткими множинами

Загальна структура систем з нечітким керуванням зображена на рис. 4.18 а, а приклад реалізації такої системи зображений на рис. 4.18 б.

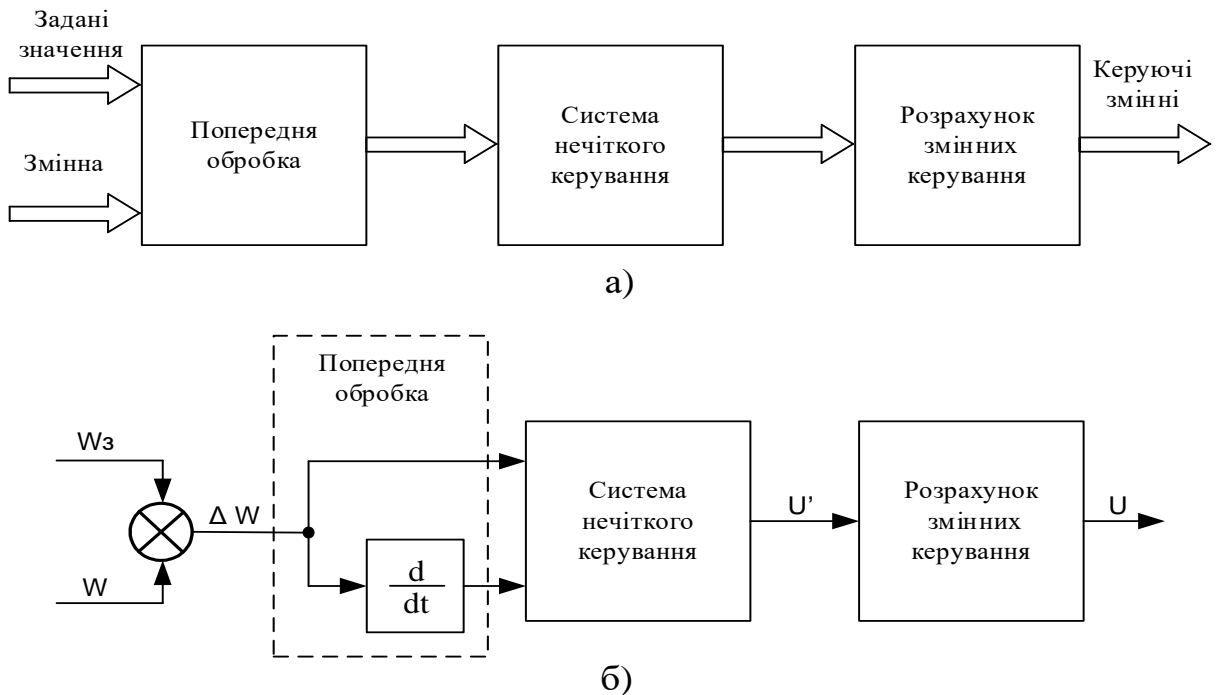


Рисунок 4.18 – Узагальнена функціональна схема нечіткого регулювання

Для застосування методів нечіткої логіки перш за все необхідно перетворити звичайні чіткі змінні в нечіткі [90]. Процес такого перетворення називається фазифікації. Діапазон зміни змінних $e(t)$ і $de(t)/dt$ розбивається на безлічі (підмножини), в межах кожного з яких будується функція приналежності змінних $e(t)$ і $de(t)/dt$ кожному з множин [91, 92]. На рис.4.19 функції приналежності, складаються з семи лінгвістичних термів (BB, BC, BM, H, DM, DC, DB) (негативне велике, негативне середнє, негативне мале, нуль, позитивне мале, позитивне середнє, позитивне велике), пропонується поставити у формі трикутника.

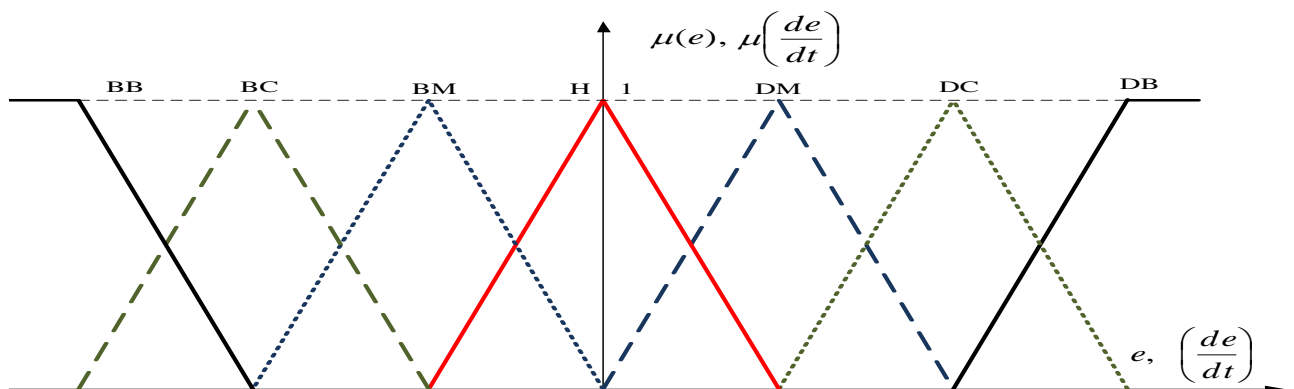


Рисунок 4.19 – Розподіл функцій приналежності помилки і швидкості її зміни

При моделюванні регулятора здійснювалося варіювання величин абсциси функції приналежності шляхом зміни кута вершини трикутника.

Завданням інференції, яка в свою чергу складається з агрегації, імплікації і акумуляції, є формування вихідного фазі-множника на основі логічних правил [93]. База правил, застосована в нечіткому ПІД-регуляторі представлена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Таблиця нечітких правил

Значення $\mu_{mN}(0, u_2)$	Значення $\mu_{mN}(u_1, 0)$							
		ВВ	ВС	ВМ	Н	DM	DC	DB
DB	Н	DM	DC	DB	DB	DB	DB	DB
DC	ВМ	Н	DM	DC	DB	DB	DB	DB
DM	ВС	ВМ	Н	DM	DC	DB	DB	DB
Н	ВВ	ВС	ВМ	Н	DM	DC	DB	DB
ВМ	ВВ	ВВ	ВС	ВМ	Н	DM	DC	DB
ВС	ВВ	ВВ	ВВ	ВС	ВМ	Н	DM	DC
ВВ	ВВ	ВВ	ВВ	ВВ	ВВ	ВВ	ВВ	ВВ

Завданням дефазифікації є перетворення акумульованого фазі-множника в чітку однозначну величину на виході фазі-блоку. Існує кілька методів дефазифікації, один з яких, наприклад, метод середнього центру представлений нижче.

$$\alpha = \frac{\int u \mu(u) du}{\int \mu(u) du}, \quad (4.32)$$

де α – вихідна координата; $\mu(u)$ – ступінь приналежності активованого терма; u – активований терм.

На рис. 4.18 в якості вхідної змінної використовується різниця між заданим і реальним значеннями контрольованого параметра, в нашому випадку, швидкості обертання двигуна. Ця різниця спільно з її похідної за часом передаються в систему нечіткого управління як дві вхідні змінні. У той же час змінна для корекції контрольованого параметра виходить на основі вихідної змінної системи нечіткого управління, за допомогою блоку розрахунку керуючих змінних [94].

Для побудови фазі-регулятора була використана вище приведена структура дискретного ПІД-регулятора (рис.4.15). Структура нечіткого ПІД-регулятора представлена на рисунку 4.20 .

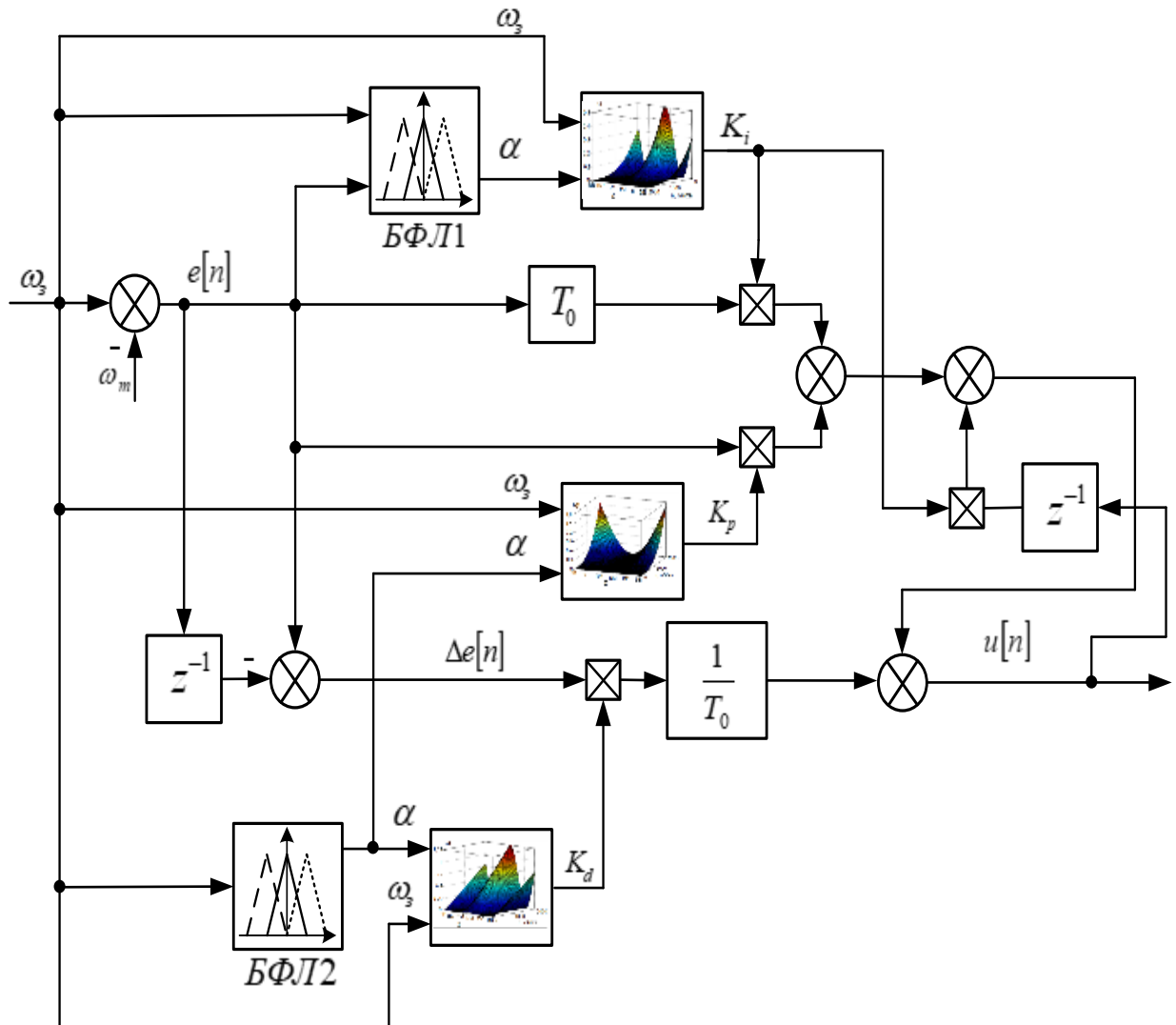


Рисунок 4.20 – Структурна схема нечіткого ПІД-регулятора

У блоці фазі-логіки (БФЛ) здійснюється три етапи обробки інформації[95]: фазифікація, інференція, дефазифікація.

З використанням математичної моделі ВІД, коефіцієнтів ПІД-регулятора, отриманих методом Чина-Хронса-Ресвіка, а також таблиці нечітких правил були знайдені коефіцієнти нечіткого ПІД-регулятора. Вони представляють собою тривимірні функції і після ручного налаштування показані на рис.4.21 -4.23.

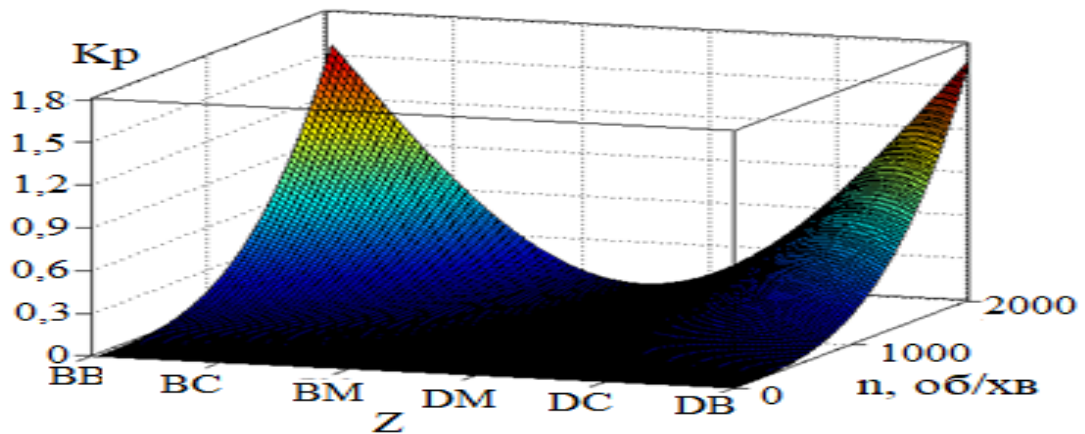


Рисунок 4.21 – Графічне представлення розподілу коефіцієнта пропорційної складової нечіткого ПД-регулятора

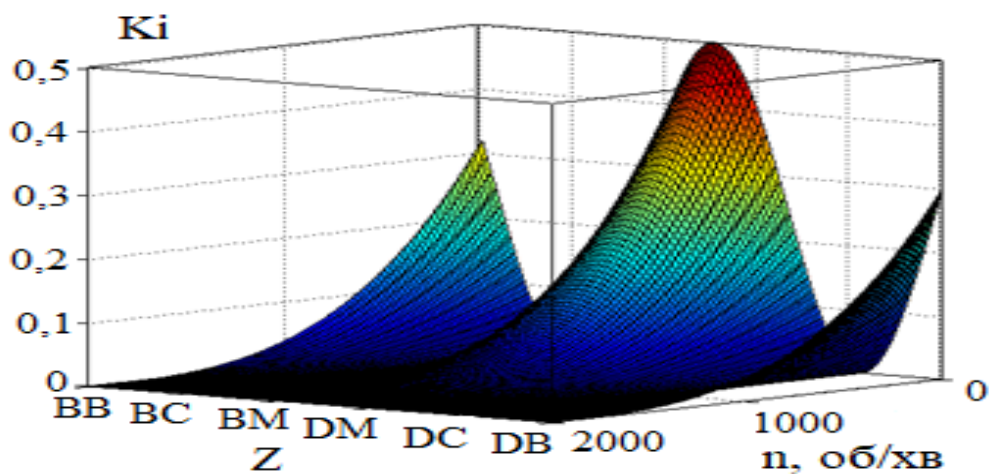


Рисунок 4.22 – Графічне представлення розподілу коефіцієнта інтегральної складової нечіткого ПД-регулятора

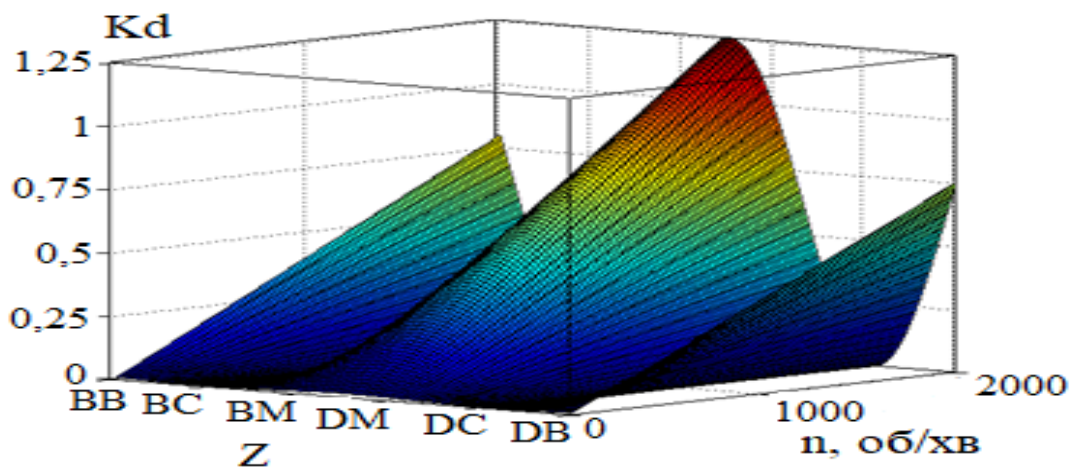


Рисунок 4.23 – Графічне представлення розподілу коефіцієнта диференціальної складової нечіткого ПД-регулятора

Для аналізу роботи синтезованого регулятора швидкості була створена його імітаційна модель, на підставі якої отримані осцилограми роботи двигуна при постійному навантаженні (характеристики фазного струму та швидкості) (рис. 4.24-4.25). Вихід двигуна на задану швидкість відбувається без перерегулювання. Також в момент часу 13 с. до машини прикладався додатковий момент опору. При цьому просадки швидкості практично не проглядається.

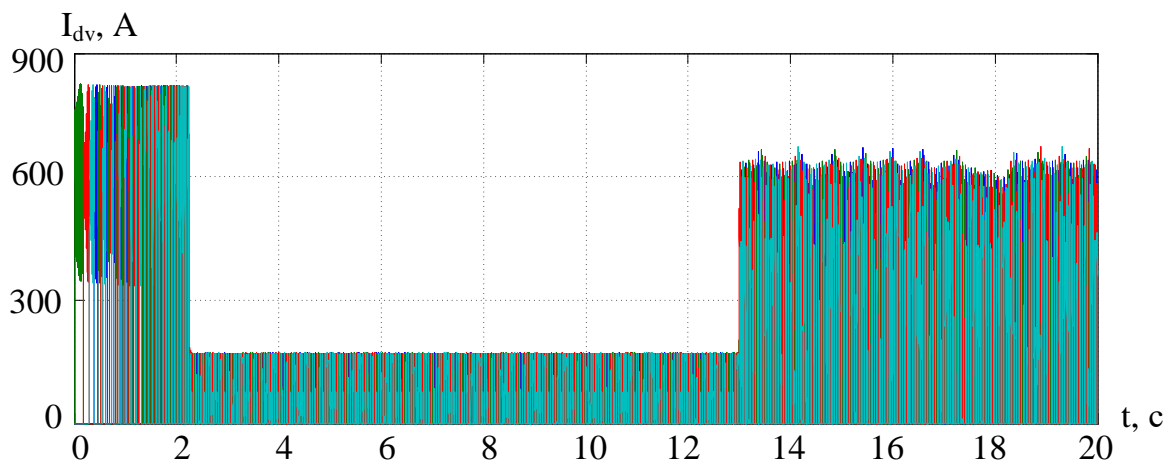


Рисунок 4.24 – Осцилограма фазних струмів ВІД з нечітким регулятором

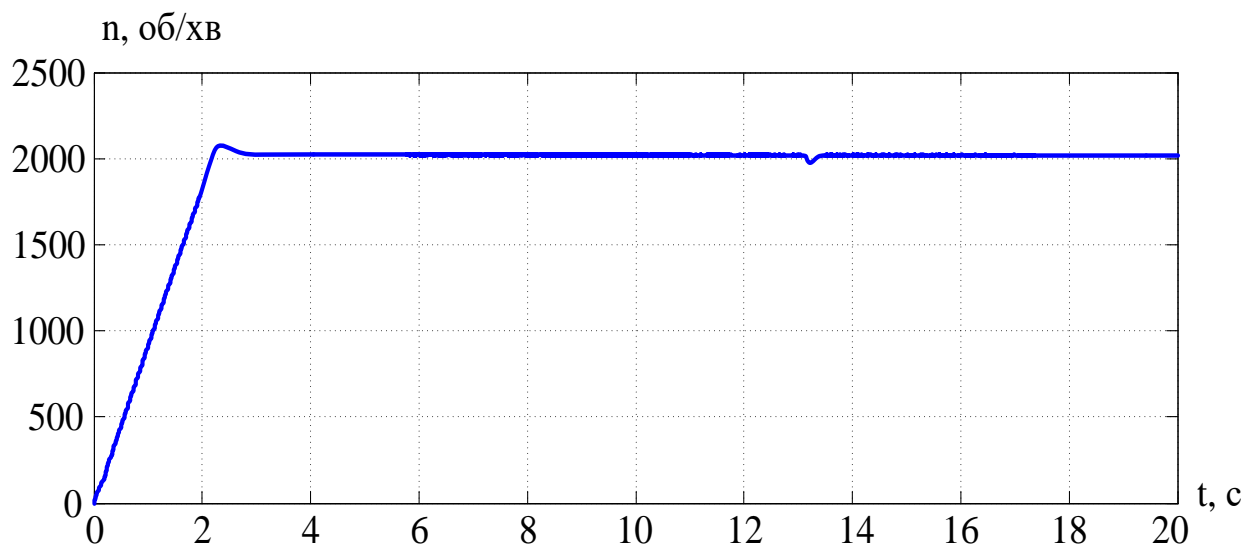


Рисунок 4.25 – Осцилограма швидкості ВІД з нечітким регулятором

При детальному перегляді осцилограм видно коливання швидкості. Присутність коливань більш високої частоти пояснюється характером поведінки електромагнітного моменту. У свою чергу низькочастотні

коливання обумовлені специфікою роботи регулятора швидкості. Але ці коливання не перевищують 1% від заданої швидкості.

Основні показники якості для отриманих регуляторів, а саме – нечіткого та модального зведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні показники якості процесів регулювання

Показники якості	Модальний регулятор	Нечіткий регулятор
Максимум перерегулювання, σ_{\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.

4.3 Узагальнена модель гібридного тепловозу з ВІП

Для дослідження роботи гібридного тепловозу з ВІП необхідно створити його узагальнену модель. З використанням всіх раніше розглянутих підструктур гібридного тепловозу та ВІП (СК з ФПД регулятором, ВІД, механічної частини) математична модель гібридного тепловозу з ВІП представлена на рис. 4.26.

Така модель дозволила отримати діаграми (рис. 4.27). В якості навантаження був використаний раніше розглянутий профіль шляху (рис.2.16).

Отримані результати в попередніх розділах дають змогу стверджувати, що найбільш оптимальний режим ведення потягу з точки зору витрат палива відповідає діаграмі (рис. 2.20) з максимальною швидкістю 50 км/год. Тому при дослідженні роботи гібридного тепловозу буде використано саме таку діаграму. Результати такого дослідження представлені на рис. 4.27.

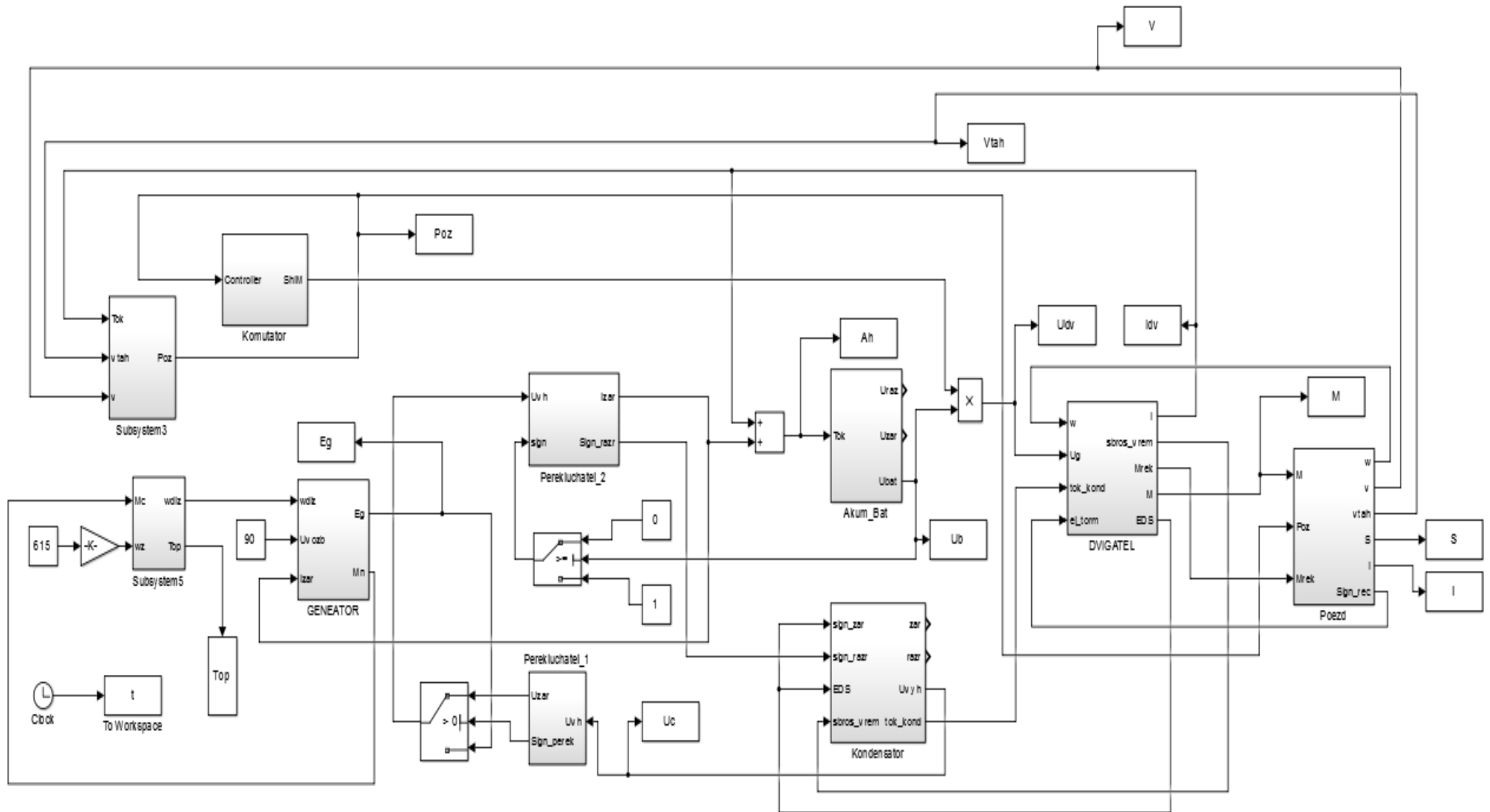


Рисунок 4.26 – Узагальнена модель гібридного тепловозу з ВІП

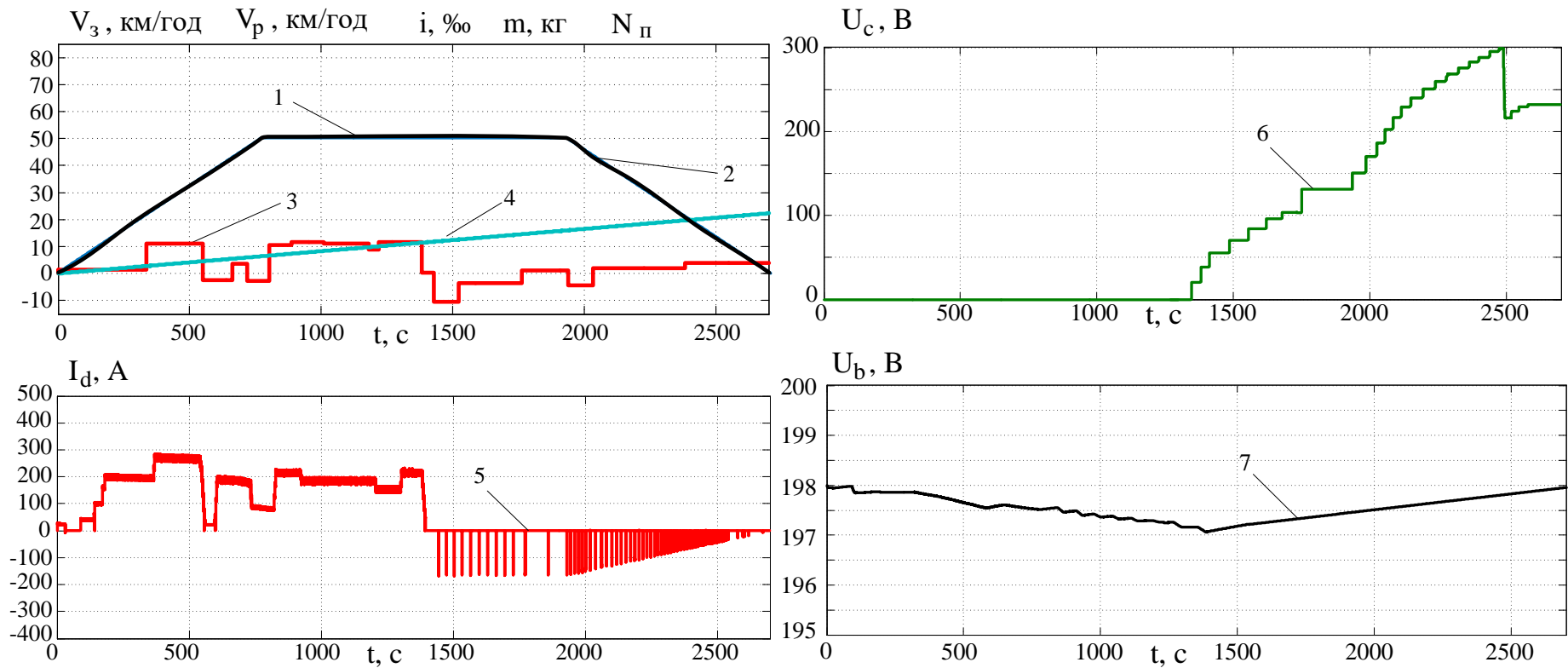


Рисунок 4.27 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ВІД при максимальній швидкості 50 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – струм тягового двигуна; 6 – напруга на конденсаторі; 6 – напруга акумуляторної батареї

Отримані результати моделювання роботи гібридного маневрового тепловозу з ВІП та нечітким ПІД-регулятором (рис. 4.27) 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.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Синтезовано модальний регулятор швидкості ВПП, розраховано коефіцієнти регулятора, що не є постійними величинами, а залежать від кута повороту ротора та МРС, побудовані тривимірні поверхні, які графічно відображають залежності коефіцієнтів. Розроблена структурна схема ВПП з модальним регулятором. На основі цієї схеми складена імітаційна модель роботи ВПП з модальним регулятором. У результаті моделювання отримані осцилограми фазних струмів двигуна та швидкості ВПП. Проаналізувавши результати моделювання визначено, що перерегулювання склало 7,8%, час регулювання 3,21 с, кількість коливань 1.

2. Розроблено та синтезовано нечіткий ПД-регулятор швидкості ВПП. З використанням математичної моделі ВД, коефіцієнтів ПД-регулятора, отриманих методом Чина-Хронса-Ресвіка, а також таблиці нечітких правил знайдені коефіцієнти нечіткого ПД-регулятора. Вони, як і для модального регулятора, представляють собою тривимірні функції. Розроблена структурна схема та імітаційна модель роботи ВПП з нечітким регулятором. Отримані осцилограми основних координат роботи ВПП (фазний струм та швидкість). У результаті аналізу осцилограм визначено, що перерегулювання склало 2,3%, час регулювання 2,14 с, кількість коливань 0.

3. Визначено, що найбільш якісний перехідний процес відповідає нечіткому регулятору швидкості, тому для подальшого дослідження роботи гібридного тепловозу з ВПП застосований саме такий тип регулятора.

4. Розроблено узагальнену модель роботи гібридного тепловозу з ВПП та нечітким регулятором. Отримані осцилограми руху тепловоза з поїздом ділянкою. На основі проведеного аналізу результатів моделювання встановлено, що завдяки більш точному підтриманню швидкості руху поїзда спостерігається зниження витрат палива та глибина розряду акумуляторної батареї.

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВІД НА МАКЕТНОМУ ЗРАЗКУ

Розділ присвячений експериментальним дослідженням на діючому обладнанні. Отримано підтвердження адекватності математичної моделі ЕМП, а також порівняння результатів цифрового моделювання з фізичним експериментом на основі 4-х фазного реактивного індукторного двигуна, як найбільш загального випадку для даної моделі.

Дослідження були спрямовані на розробку системи управління ВІД і перевірку її ефективності з різними типами регуляторів швидкості.

5.1 Опис структури системи управління ВІД

Електромеханічні перетворювачі енергії є складовим елементом системи перетворення енергії в рухомому складі (РС). Їх створення і робота нерозривно пов'язані з системою перетворення енергії в РС. Тип і режими роботи визначають структуру тягового електроприводу, склад обладнання і компонування РС. Але, на жаль, на сьогоднішній день існує складність у проведенні експериментальних досліджень на ВІД через відсутність таких машин з геометричними розмірами і параметрами, які відповідають тяговим двигунам, застосовуваним на існуючому РС [95, 96].

Тому, як об'єкт управління був обраний чотирьохфазний ВІД, розроблений одеським колективом під керівництвом д.т.н. проф. Римші В.В. Загальний вигляд електродвигуна спільно з редуктором і колісною парою, а також конфігурація такої машини представлені на рис.5.1 і 5.2 відповідно. Основні технічні дані наведені в табл. 5.1.

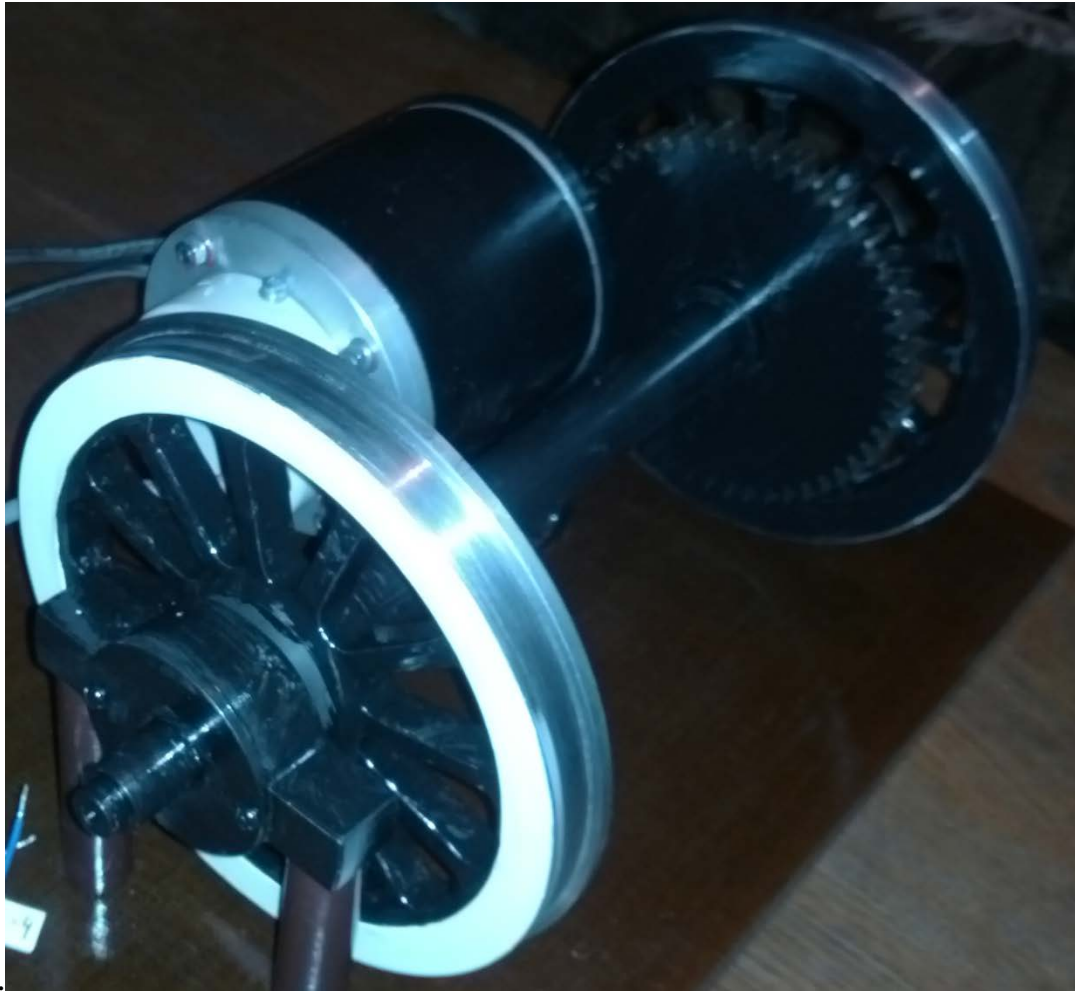


Рисунок 5.1 – Загальний вигляд чотирьохфазного ВІД.

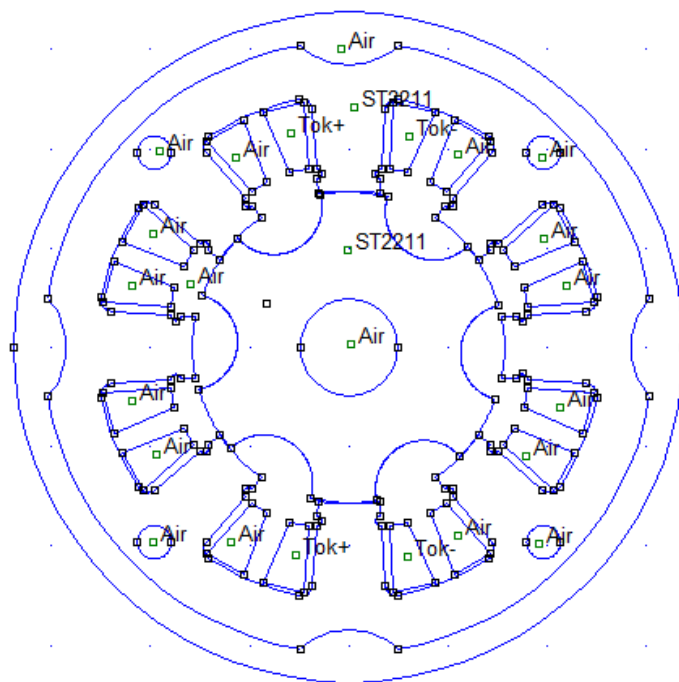


Рисунок 5.2 – Конфігурація чотирьохфазного ВІД в середовищі FEMM.

Таблиця 5.1 – Основні технічні дані ЕМП ВІД

Найменування параметра	Значення
Номинальна напруга фази, В	220
Максимальний фазний струм, А	10
Номинальна частота обертання, об/хв	10000
Діаметр ротора, мм	57,4
Активна довжина ротора, мм	60
Діаметр розточки статора, мм	58
Внутрішній діаметр вікна статора, мм	83
Зовнішній діаметр статора, мм	106
Ширина зубця статора, мм	11
Ширина зубця ротора, мм	12,2
Число витків обмотки фази	60
Сумарна маса стали ЕМП, кг	0,56
Момент інерції ротора, $кг \cdot м^2$	$21,6 \cdot 10^{-6}$
Активний опір фази, Ом	0,34
Сумарні втрати в обмотці статора ЕМП, Вт	12,4
Сумарні втрати в магнітопроводі ЕМП, Вт	11,3
ККД при найменшому навантаженні, %	62,7
Номинальний момент, Нм	0,2
Довжина сердечника статора, м	0,12

Запропонована функціональна схема системи управління для даного ВІД приведена на рисунку 5.3. 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 (рис.5.4).

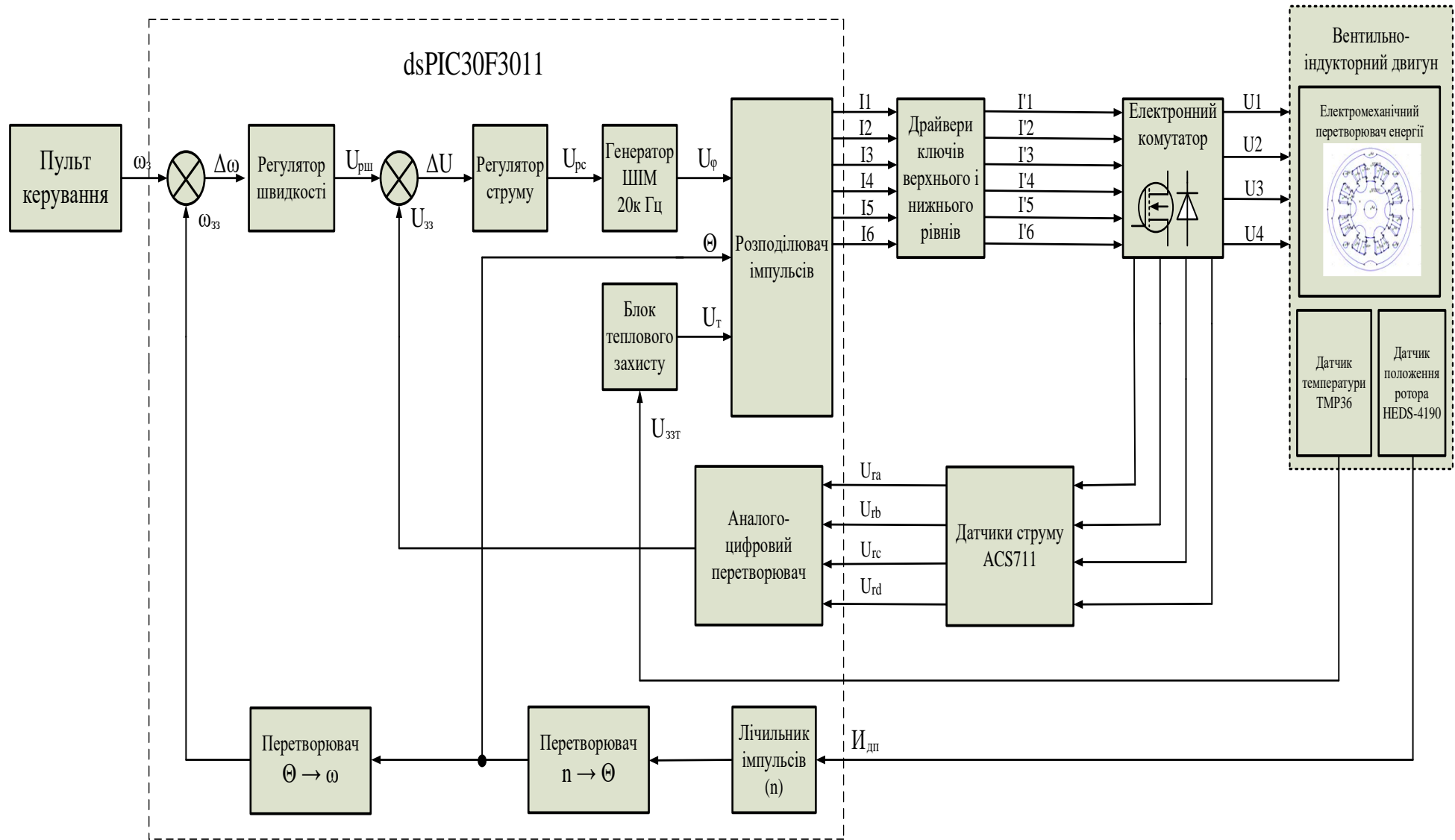


Рисунок 5.3 – Функціональна схема системи управління ВІД.

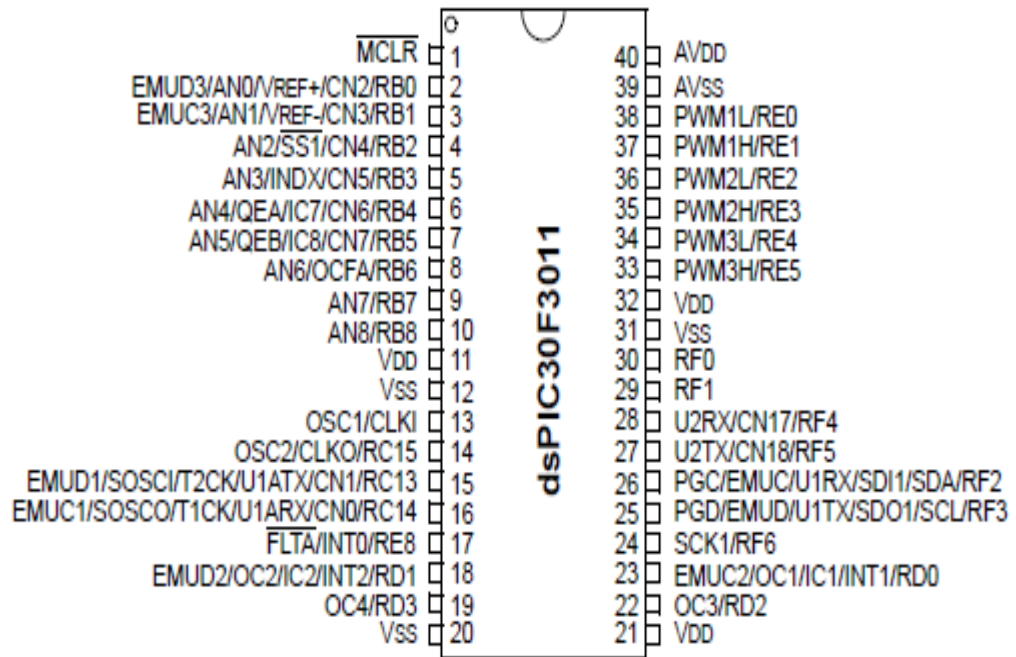


Рисунок 5.4 – Загальний вигляд мікроконтролера dsPIC30F3011.

Ядро контролера побудовано за модифікованою Гарвардської архітектури з розширеною системою команд. Архітектура не є якою-небудь модифікацією звичних для розробників 8-бітних ядер Microchip - це абсолютно нова розробка [96]. Мікроконтролер dsPIC30 підтримує виконання специфічних для алгоритмів цифрової обробки сигналів інструкцій (множення з накопиченням), спеціальні методи адресації (модульна, біт-реверсивна). dsPIC30 має векторну пріоритетну систему переривань, можливість виведення частини програмної пам'яті в нереалізовану на кристалі область ОЗУ, знакові обчислення з цілими числами і числами з фіксованою точкою [97]. Система команд ядра має два класи: мікроконтролерні інструкції і команди цифрової обробки сигналів. Обидва ці класу рівноправно інтегровані в архітектуру контролера і управляються одним ядром. 16-бітове арифметико-логічний пристрій (АЛП) дозволяє виконувати за один командний такт наступні операції: додавання, віднімання, бітовий зсув і порозрядні логічні операції, включаючи інверсію. Багато елементів схеми, такі як АЦП, модуль управління ШІМ з шістьма виходами (розподільник імпульсів), модуль квадратурного енкодера

(лічильника імпульсів), вже входять до складу мікроконтролера, завдяки чому основні завдання, які програмно вирішуються були перекладені на апаратну частину. Це дозволило розвантажити центральний процесор, відвівши останню під реалізацію різних методів управління, в тому числі, і з застосуванням складних математичних обчислень [98].

На відміну від схеми включення асинхронного двигуна, схема включення ВІД має істотну перевагу, оскільки виключає появу струмів короткого замикання при одночасному відкритті верхнього і нижнього силових ключів одного плеча. Появи струму короткого замикання небезпечні виходом з ладу джерела живлення U_d , а також транзисторів і пристроїв їх управління. Для живлення електродвигуна використовується схема електронного комутатора, показана на рис. 5.5.

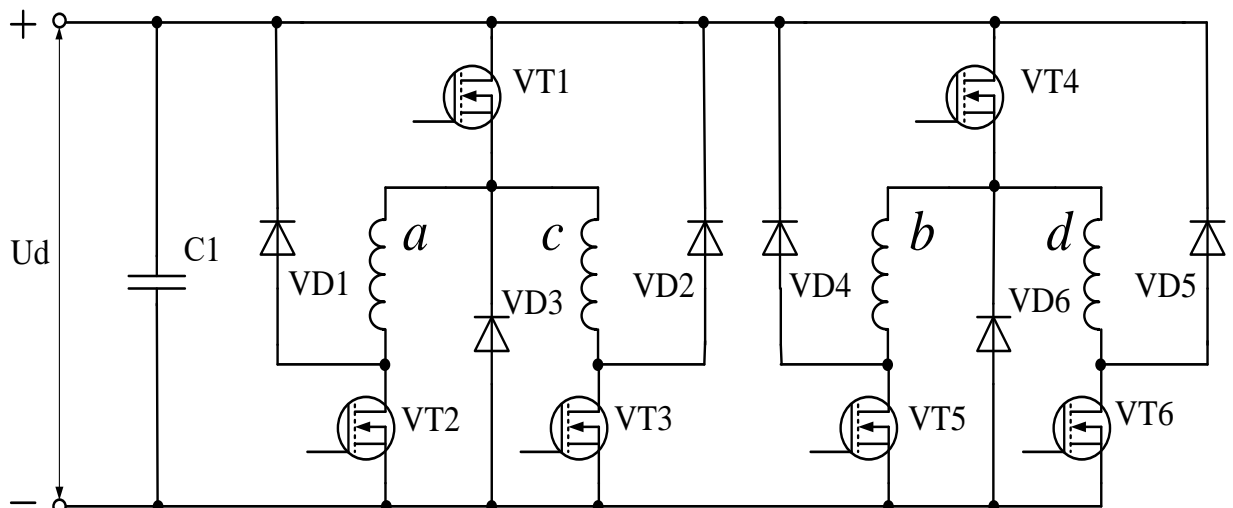


Рисунок 5.5 – Схема електронного комутатора

Виходячи з того, що одночасна робота фаз, які розташовані один відносно одного під кутом 90 геометричних градусів (фази a, з і b, d) неможлива, а також з метою зниження кількості силових елементів в схемі, ці фази об'єднані в групи. Для роботи 4-х фазного електромеханічного перетворювача, при об'єднанні його фаз в групи, схема буде складатися з шести силових транзисторів і шести зворотніх діодів. Схему, зображену на рис. 5.5, прийнято ще називати схемою Міллера. За допомогою такого перетворювача реалізується одиночна симетрична комутація фаз з можливістю використання обмеження по струму. В електронному комутаторі

використані польові транзистори типу IRFPG50, загальний вигляд і конфігурація яких показана на рис.5.6.

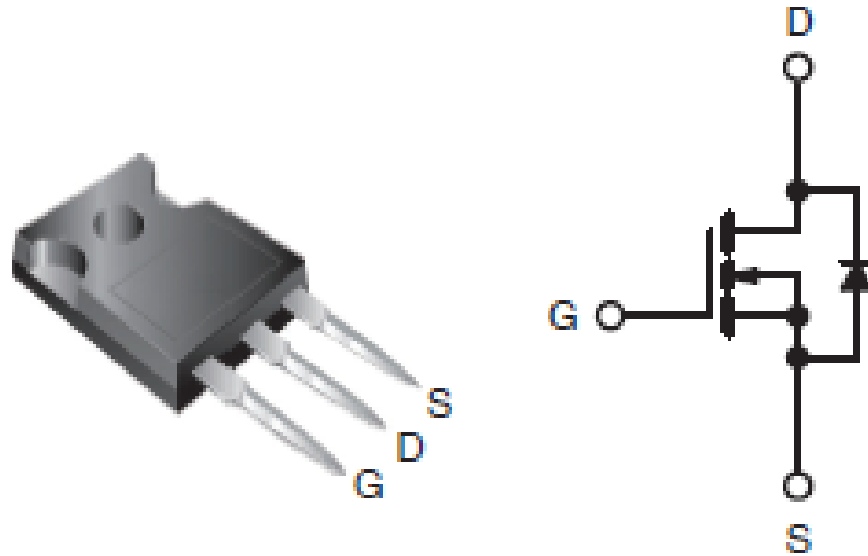


Рисунок 5.6 – Загальний вигляд і конфігурація транзистора IRFPG50.

Нормальна робота таких транзисторів забезпечується в температурному діапазоні (-55 - +150) °С при номінальній напрузі 1000 В і номінальному струмі 16 А. Низька паразитна індуктивність забезпечує високу якість перехідних процесів в режимах перемикування транзистора і можливість роботи на високих частотах ШІМ.

Під час роботи фази, коли верхній ключ закритий, здійснюється «одноключева» комутація. При цьому струм замикається через зворотний діод Шотки (STTH6012). Відмінні риси таких діодів наступні: низьке пряме падіння напруги, високу швидкодію, фактична відсутність заряду зворотного відновлення. Кращим є використання діодів Шотки в потужних перетворювачах на високих частотах перемикування.

Найбільш поширеним способом управління польовими транзисторами в мостових схемах є використання драйвера ключів нижнього і верхнього рівнів спільно. Але, на жаль, через специфіку застосування електронного комутатора і управління ключами, в роботі довелося використовувати драйвери як високого, так і низького рівнів. При використанні такої схеми комутації (рис.5.5) маємо 2 ключа верхнього рівня і 4 - нижнього рівня.

Отже, будемо застосовувати 2 драйвера ключів верхнього і 2 драйвера ключів нижнього рівнів. Найпоширенішими в таких випадках мікросхемами-драйверами є IRS21850 (драйвер ключа верхнього рівня) і IR4426 (драйвер ключів нижнього рівня). Формована мікроконтролером ШІМ, через розглянуті типи драйверів передається до схеми комутації (рис.5.5).

Для контролю положення ротора, а також швидкості і напрямку його обертання, використовується вбудований в конструкцію ВІД оптичний інкрементальний датчик HEDS-4190, що дозволяє отримати 360 імпульсів за один оборот валу, і пов'язаний безпосередньо з квадратурних енкодером мікроконтролера. Принцип роботи такого датчика представлений на рисунку 5.7.

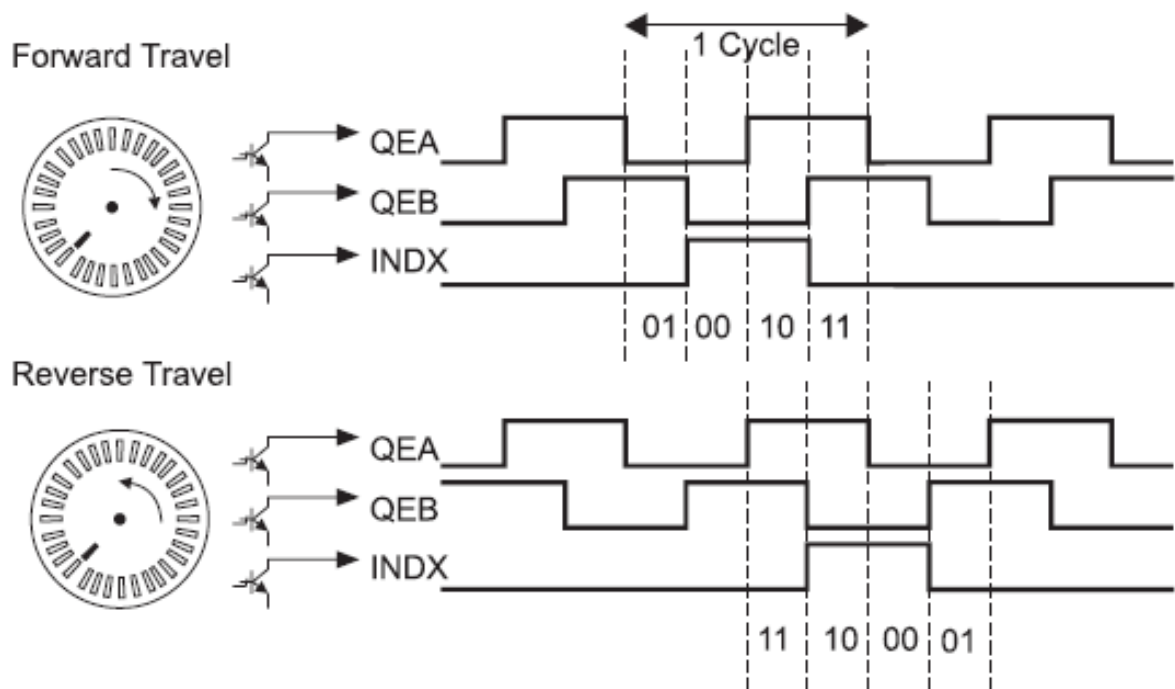


Рисунок 5.7 – Принцип роботи квадратурного енкодера HEDS-4190.

Енкодер представляє собою диск, розміщений на валу двигуна і модуль детектора, що визначає положення цього диска. Енкодер має три виводи: фаза А, фаза В і індексний вихід, інформація з яких декодується для отримання інформації про обертання валу двигуна. Визначення напрямку обертання машини здійснюється за допомогою фаз енкодера, шляхом встановлення черговості подачі імпульсів на дані виводи. Індексний вихід

забезпечує обнуління контролера після кожного обороту валу двигуна і тим самим усуває можливість накопичення помилки під час його обертання.

Датчиками струму служать мікросхеми ACS711, що працюють за принципом Холла, напруга з яких вимірюється АЦП. Переваги таких датчиків – висока надійність і довговічність, малі габарити, а недоліки – постійне споживання енергії і порівняно висока вартість.

Інформація про температуру обмоток ВІД знімається датчиком типу TMP36.

Поєднана робота системи управління з силовою частиною здійснюється через гальванічну розв'язку з допомогою DC-DC перетворювачів P6AU, а також мікросхем ADUM1201, з використанням інтегральних планарних трансформаторів. Основна перевага перед мікросхемами з оптоелектронною розв'язкою – широкий діапазон робочих температур і інших зовнішніх факторів. У порівнянні з мікросхемами розв'язки на основі вбудованих високовольтних конденсаторів, дані мікросхеми допускають високі швидкості наростання різницевої напруги.

З використанням раніше розглянутих елементів електроніки, а також за допомогою програмного комплексу PCAD (призначений для проектування друкованих плат), була створена електрична схема системи управління ВІД (рис. 5.8).

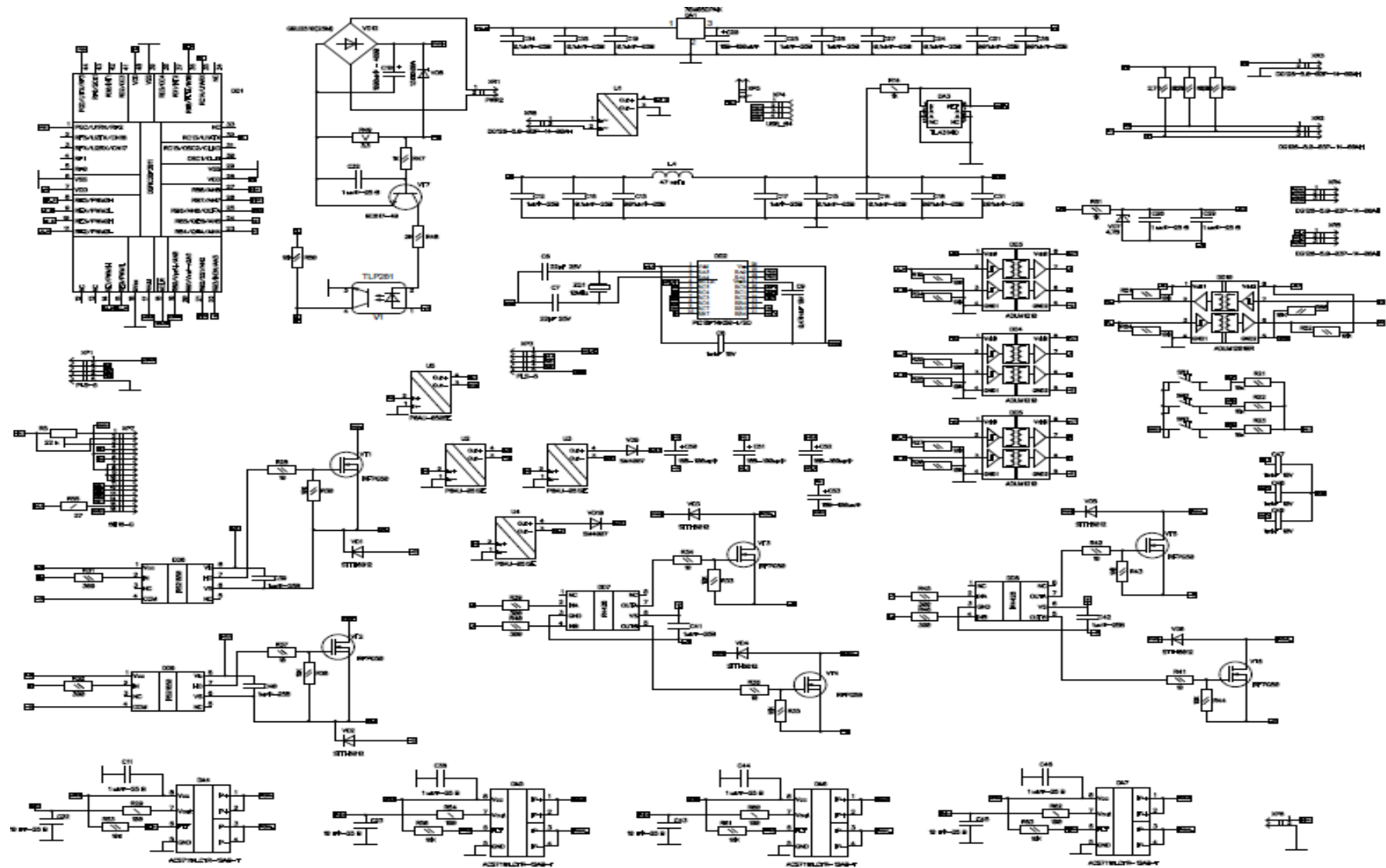


Рисунок 5.8 – Електрична схема системи управління ВІД в програмному комплексі PCAD

5.2 Лабораторні дослідження тягового ВПП

Зовнішній вигляд макетного зразка ВПП показаний на рисунку 5.9. 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 $U_d = 100V$ при проведенні випробувань підтримувалося на постійному рівні з частотою ШІМ 20кГц і з обмеженням струму на рівні 3А. Для зручності роботи з макетом передбачено підключення ЖК дисплея, з можливістю виведення різної інформації, що особливо важливо на етапі налагодження.

Випробування ВПП 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.

Програма для прошивки контролера написана на мові C++ з використанням студії MPLAB. Програмний алгоритм для управління ВПП показаний на рис.5.10. Програма починається функцією ініціалізації контролера, яка складається з портів введення-виведення, настройки тактового генератора, переривань, настройки модуля ШІМ, АЦП, модуля квадратурного енкодера і настройки таймерів.



Рисунок 5.9 – Зовнішній вид макетного зразка ВПІ

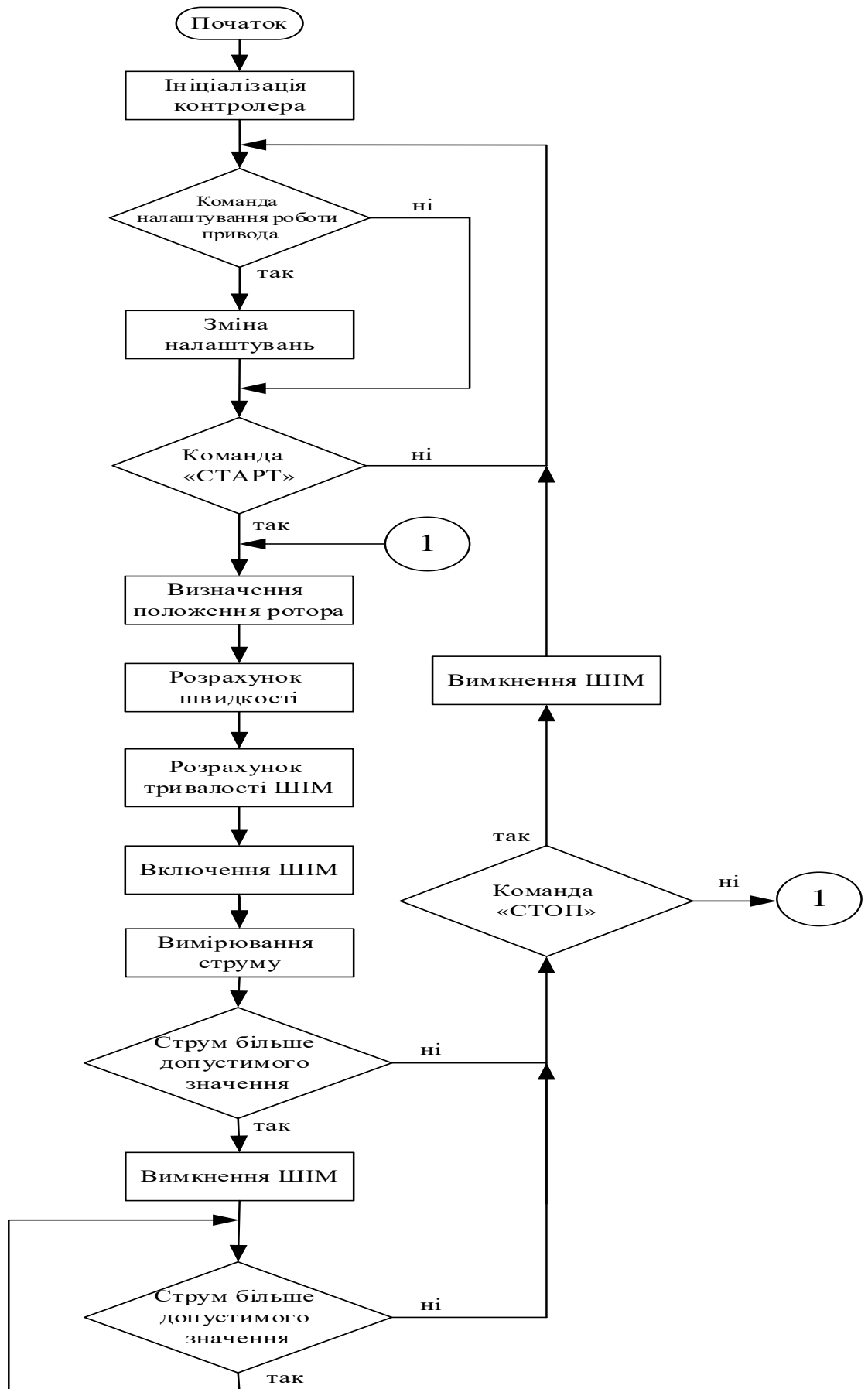


Рисунок 5.10 – Алгоритм управління ВПІ

Команда налаштування роботи, включає в себе можливість користувачем отримати бажаний процес роботи приводу: вибір інтенсивності пуску, зупинки, швидкості обертання, пускового струму, типу регулятора швидкості. Після вибору налаштувань роботи приводу і дозволу команди «СТАРТ» контролером проводиться визначення положення ротора, розрахунок поточної швидкості і переведення її в необхідне значення тривалості ШІМ (в залежності від вибору типу регулятора швидкості), включення ШІМ. Далі контролер за допомогою датчиків струму виконує вимірювання фазного струму і його обмеження. Алгоритм роботи обраного типу регулятора швидкості виконує блок «обчислення тривалості ШІМ». Після закінчення одного циклу даного алгоритму контролером проводиться опитування команди «СТОП» і після її підтвердження контролер повертається в режим очікування команди налаштування роботи приводу, а потім і команди «СТАРТ».

Графіки фазного струму і напруги з використанням раніше розглянутого перетворювача були зняті на цифровому осцилографі типу RIGOL DS5022M. На рисунку 5.11 представлені осцилограми фазної напруги і струму для різних швидкостей обертання машини ($n=1000$ об/хв, $n=1500$ об/хв, $n=2000$ об/хв). На отриманих осцилограмах показані режими К1, К2 і К3. У режимах К1 і К2 нижні ключі VT2, VT3 або VT5, VT6 (рис. 5.5) постійно відкриті, а верхні працюють в імпульсному режимі. Коли верхній ключ VT1 або VT4 відкритий, струм від джерела протікає через обмотку ВІД і наростає. При закритому ключі струм протікає через зворотний діод, встановлений паралельно кожної з обмоток. Такий режим називається «одноключевою» комутацією. При «двохключевій» комутації обидва ключа закриваються (режим К3), і струм протікає через джерело.

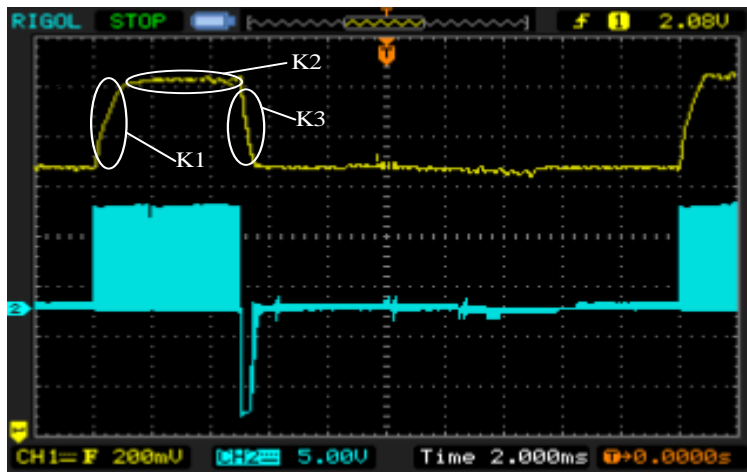
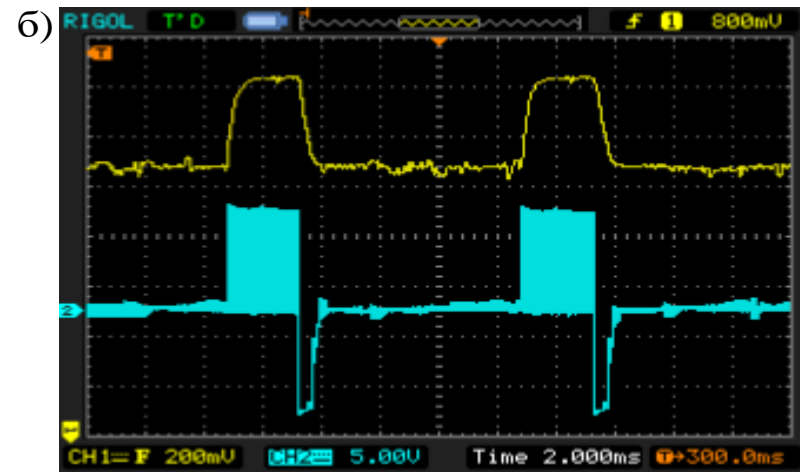
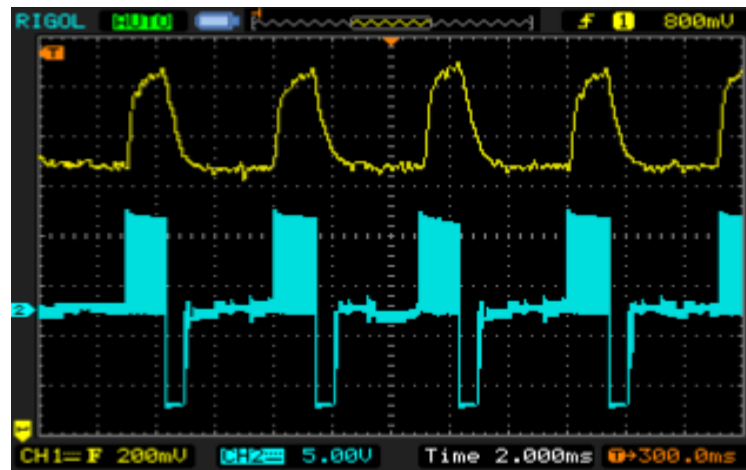
а) $n=1000$ об/хвб) $n=1500$ об/хвв) $n=2000$ об/хв

Рисунок 5.11 – Експериментальні осцилограми струму і напруги фази ВІД для різних швидкостей і моментів опору.

Масштаби одна клітина: для струму - 2 А; для напруги - 50 В

При цьому час його спадання значно зменшується, що дуже важливо при роботі машини на високих швидкостях обертання валу, коли струм може не встигнути знизитися до нуля і буде породжувати гальмівний момент, унеможливаючи подальше збільшення швидкості обертання машини [87, 96]. Робочий період фази становить $22,5^\circ$, з можливістю її включення в сторону випередження, відставання і без фазового зсуву. В даному випадку включення фази проводиться з випередженням на кут 7° [98]. При цьому струм в момент зростання магнітної провідності встигає досягти необхідного значення для створення електромагнітного моменту. У момент закриття ключів (режим КЗ) через зворотні діоди до обмотки прикладається зворотна напруга, яке сприяє більш швидкому спаданню струму. У неактивний період роботи фази, коли до неї не підводиться напруга U_d , наведена ЕРС має імпульсний характер і після досягнення максимуму повільно спадає, що говорить про швидкій зміні магнітного потоку в фазі ВІД.

За допомогою макетного зразка була знята природна механічна характеристика ВІД, показана на рис. 5.12. Результати випробувань ВІД для кількох значень моменту навантаження наведені в табл. 5.2.

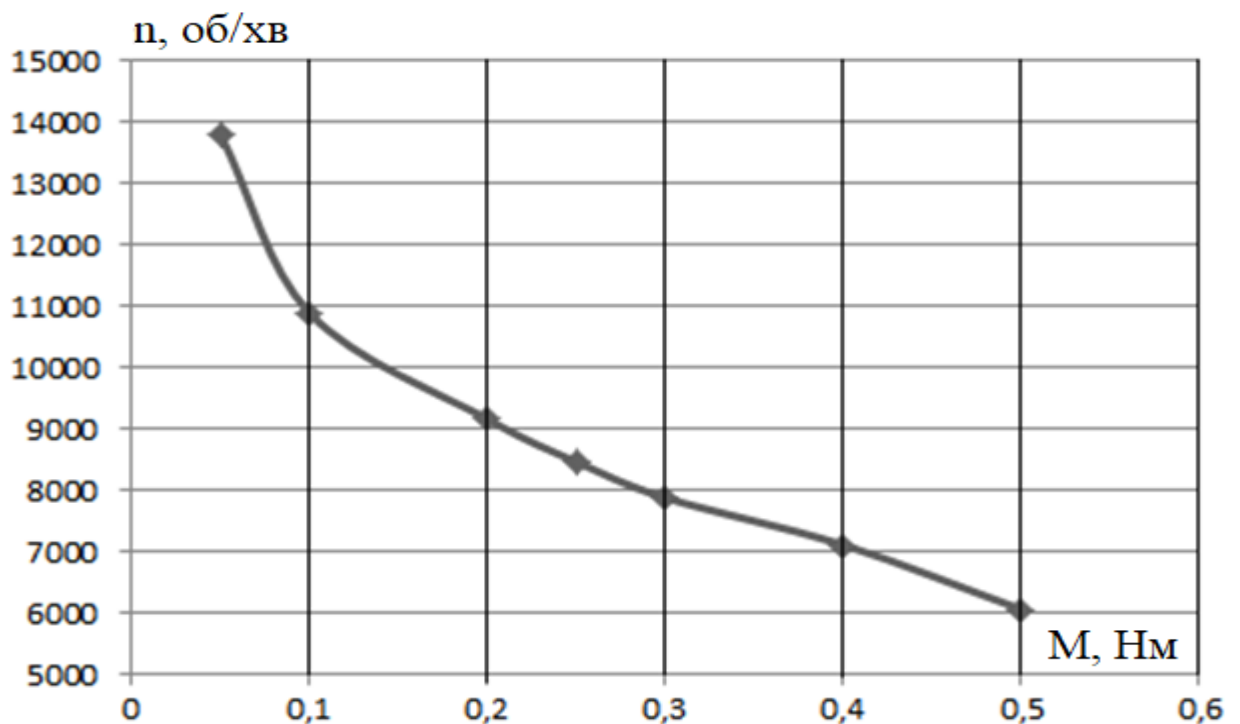


Рисунок 5.12 – Механічна характеристика ВІД

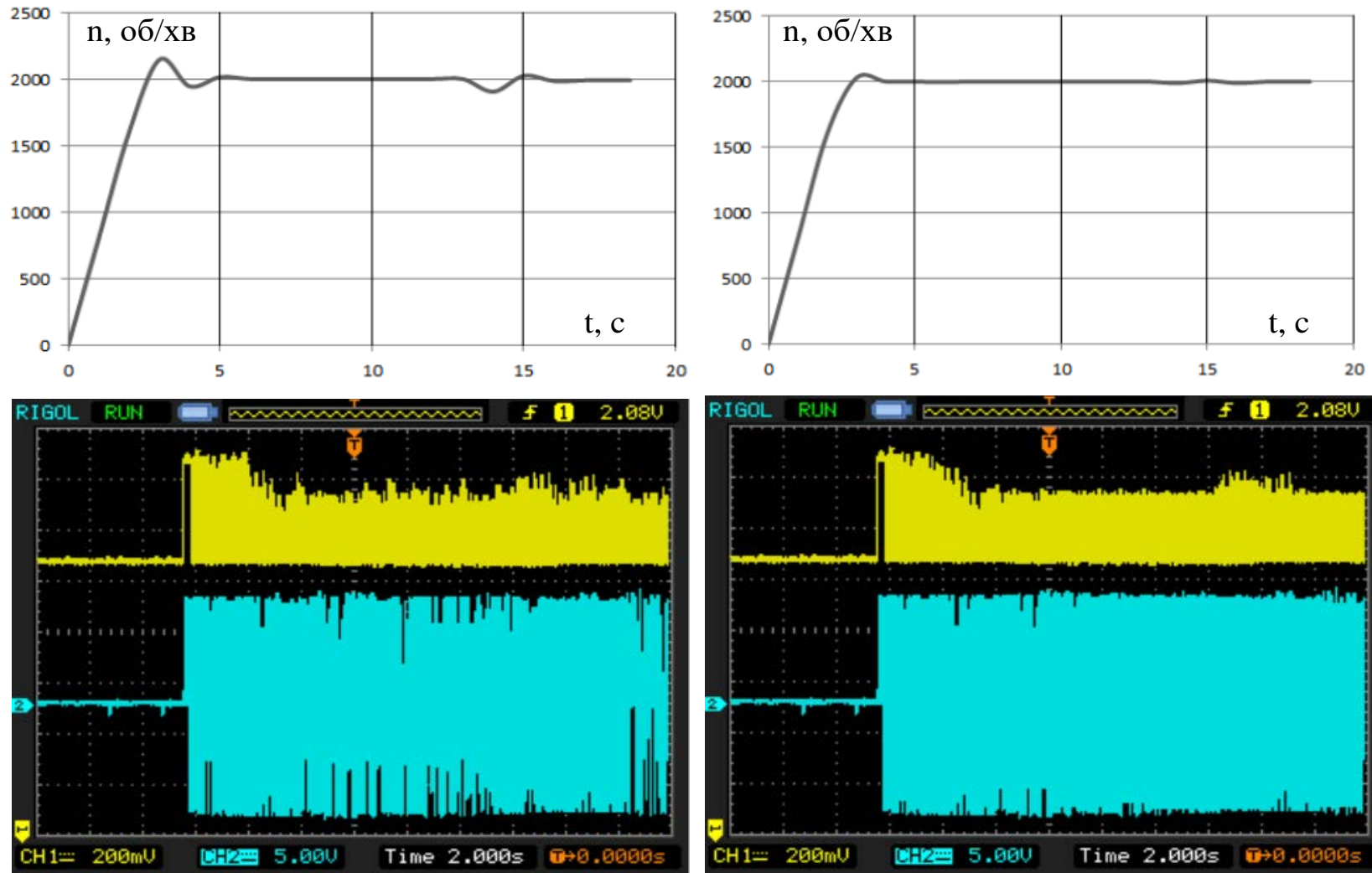
Таблиця 5.2 –Результати випробування макетного зразка

<i>M, Нм</i>	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
<i>n, об/хв</i>	13790	10885	9160	8465	7880	7110	6060
<i>I, А</i>	1,69	2,22	2,38	2,61	3,21	3,58	3,89

Використовуючи раніше розглянутий принцип побудови нечіткого регулятора, були синтезовані коефіцієнти пропорційної, інтегральної і диференціальної ланок.

Для дослідження і вибору регулятора, який забезпечує найбільш якісний перехідний процес швидкості, була реалізована робота двох типів: модального та нечіткого ПД-регулятора. Поточна швидкість, яка визначалася розрахунковим шляхом, по UART передавалася додатковому 8-розрядному мікроконтролеру PIC18F14K50. Такий контролер має вбудований модуль для передачі даних по послідовній шині USB, через яку зв'язаний з комп'ютером.

На рис. 5.13 представлені характеристики перехідного процесу швидкості з двома типами регуляторів. Після виходу двигуна на швидкість завдання 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 ФПД-регулятора. 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.



а) з модальним регулятором

б) з ФПД-регулятором

Рисунок 5.13 – Осцилограма роботи ВПІ з різними типами регуляторів

Слід також зауважити, що в процесі роботи приводу був досліджений аварійний режим двигуна з використанням нечіткої логіки (в перетворювачі штучно задавалося відключення однієї з фаз). При цьому здійснювалася безперебійна його робота, що підтверджується отриманими осцилограмами (рис. 5.14).

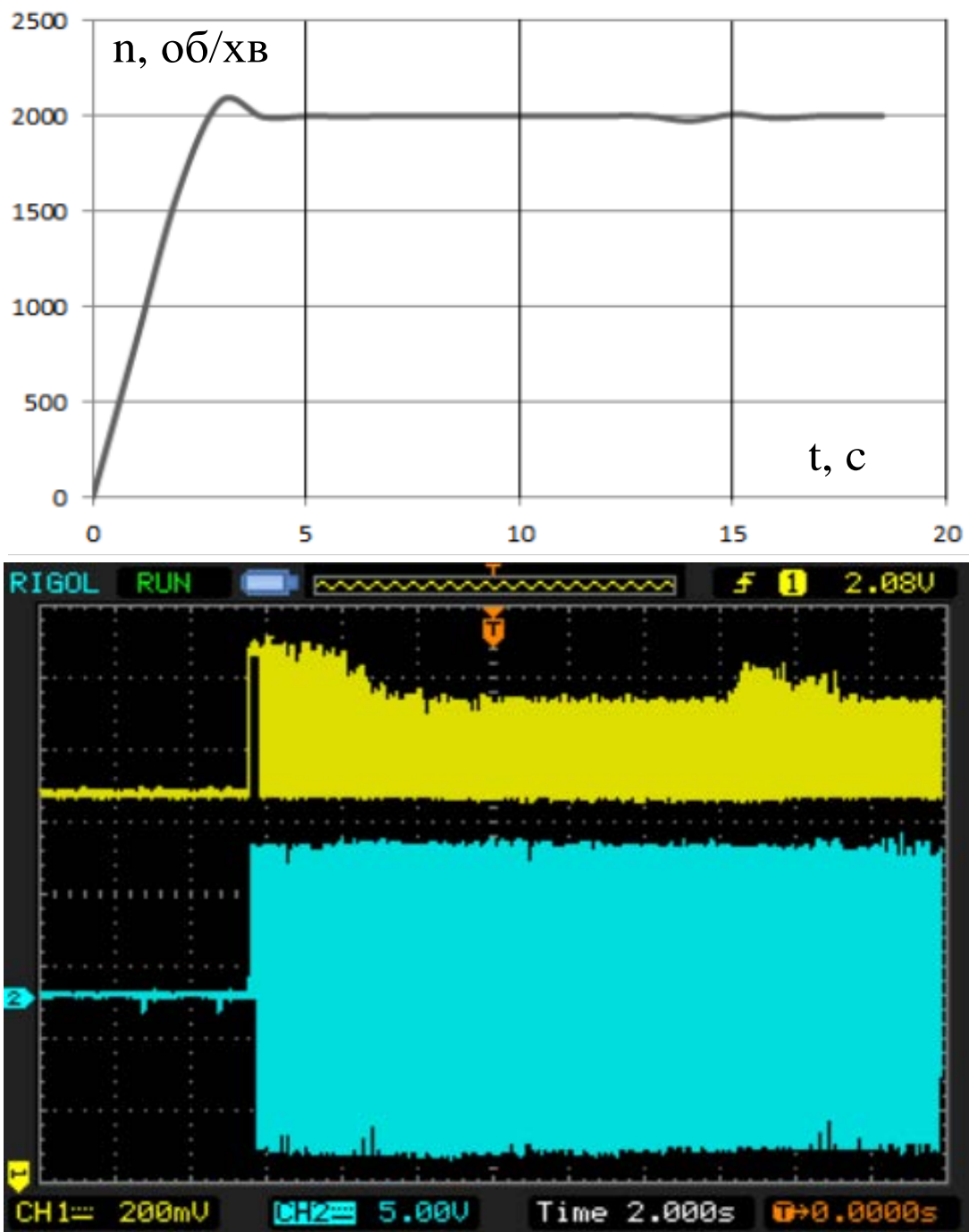


Рисунок 5.14 – Осцилограми роботи ВІП при штучно вимкненій фазі

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

Експериментальні дослідження ВІП показали доцільність використання мікропроцесорної системи керування, яка розширює функціональні можливості приводу, дає можливість використовувати безконтактні датчики нового покоління, захищає двигун під час його роботи від перевантажень.

Результати досліджень показали, що створення приводів на основі ВІД дозволяє підвищити їх надійність (при виході з ладу однієї обмотки двигун продовжує свою роботу), швидкодія і ККД.

Використання перетворювача дає можливість за рахунок регулювання швидкості двигуна забезпечити керування процесом руху РС, що значно покращує динамічні характеристики приводу. Використання в системі керування нечіткого ПІД-регулятора дозволяє забезпечити більш якісний процес регулювання швидкості.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи вирішена науково-практична задача вдосконалення гібридної системи та дослідження гібридного тепловоза на базі вентиляно-індукторного двигуна з використанням системи керування з різними типами регуляторів швидкості для отримання заданого закону керування рухом поїзда та зменшення витрат палива. Перевагою запропонованої системи є застосування мікропроцесорної техніки, що дозволяє відпрацьовувати заданий режим ведення поїзда, застосовувати вентиляно-індукторний привід, а також реалізовувати нелінійні регулятори швидкості, захистити елементи електродвигуна від пошкодження, а також здійснювати контроль процесу зарядки акумуляторної та конденсаторної батарей локомотива.

1. 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; генератора постійного струму зі збуджувачем; тягового електричного приводу з урахуванням сил, що діють на потяг, профілю шляху.

2. Розроблена імітаційна модель роботи тепловоза з використанням реального профілю шляху ділянки Харків–Мерефа, основних рівнянь руху потягу та отримані осцилограми роботи тепловоза при різних тахограмах руху поїзда.

3. 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.

4. Розроблено функціональні схеми накопичувачів енергії, в основу роботи яких покладені зарядно-розрядні характеристики, що були апроксимовані методом поліномів Чебишева.

5. Розроблено імітаційну модель роботи гібридного тепловоза з використанням реального профілю шляху ділянки Харків–Мерефа та основних рівнянь руху потягу.

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

7. Розроблено узагальнену модель роботи гібридного тепловозу з вентиляльно-індукторним приводом та нечітким регулятором та отримані осцилограми руху тепловоза з поїздом ділянкою.

8. Для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі вентиляльно-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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Собенин Л. А. Устройство и ремонт тепловозов: Учебник для нач. проф. образования / Л. А. Собенин, В. И. Бахолдин, О. В. Зинченко, А. А. Воробьев. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 416 с.
2. Марченко В. С. Электрооборудование тепловозов: Справочник / В. С. Марченко, А. А. Сергеев, В. Т. Иванченко и др. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 248 с.
3. Кузьмич В. Д. Тепловозы: Основы теории и конструкция: Учеб. для техникумов / В. Д. Кузьмич, И. П. Бородулин, Э. А. Пахомов и др. – М.: Транспорт, 1991. – 352 с.
4. Володин А. И. Локомотивные энергетические установки: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / А. И. Володин, В. З. Зюбанов, В. Д. Кузьмич и др. – М.: ИПК «Желдориздат», 2002. – 718 с.
5. Симсон А. Э. Двигатели внутреннего сгорания (тепловозные дизели и газотурбинные установки) . Учебник / А. Э. Симсон, А. З. Хомич, А. А. Куриц и др. – М.: Транспорт, 1980. – 384 с.
6. Грищенко А.В. Новые электрические машины локомотивов: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / А. В. Грищенко, Е. В. Козаченко – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 271 с.
7. Денис І. В. Обґрунтування необхідності модернізації тепловозу ЧМЕЗ із використанням гібридної силової установки / С. Г. Буряковський, А. С. Маслій, Д. П. Помазан, І. В. Деніс // Електрифікація транспорту. – Дніпро : ДНУЗТ, 2016. – №12. – С. 82-85.
8. Тепловоз ТЭМ2У: Руководство по эксплуатации и обслуживанию / ПО «Брянский машиностроит. з-д» имени В. И. Ленина. – М.: Транспорт, 1988. – 256 с.
9. Нотик З. Х. Электрические схемы тепловозов ТЭМ2 и ТЭМ1 / З. Х. . Нотик – М.: Транспорт, 1980. – 80 с.

10. Кононов В. Е. Тепловозы. Механическое оборудование. Устройство и ремонт. 2-е изд. / В. Е. Кононов, Н. М. Хуторянский, Скалин А.В. – М.: Желдориздат, Трансинфо, 2005. – 568 с.
11. Рудая К. И. Тепловозы. Электрическое оборудование и схемы. Устройство и ремонт: Учеб. для техн. шк. / К. И. Рудая, Е. Ю. Логинова – М.: Транспорт, 1991. – 303 с.
12. Володин А. И. Локомотивные двигатели внутреннего сгорания. / А. И. Володин – М.: Транспорт, 1978. – 239 с.
13. Нотик З. Х. Тепловозы ЧМЭЗ, ЧМЭЗТ, ЧМЭЗЭ: Пособие машинисту. -2-е изд., перераб. и доп. / З. Х. Нотик – М.: Транспорт, 1996. – 444 с.
14. Грудин Н.А. Электронный регулятор дизеля тепловоза ЧМЭЗ: Учебное пособие / Н.А. Грудин – М.: Маршрут, 2005. – 79 с.
15. Скалин А. В. Электрические машины и аккумуляторные батареи тепловозов / А. В. Скалин, В. Ф. Бухтеев, В. Е. Кононов – М.: Желдориздат, Трансинфо, 2005. – 232 с.
16. Логунов В. Н. Устройство тепловоза ТГМ6А / В. Н. Логунов, В. Г. Смагин, Ю. И. Доронин и др. – М.: Транспорт, 1989.–320 с
17. Балашов А. В. Тепловоз ТЭМ7 / А. В. Балашов, И. И. Зеленов, Ю. М. Козлов – М.: Транспорт, 1989. – 294 с.
18. Симсон А. Э. Тепловозные двигатели внутреннего сгорания: Учебник для вузов / А. Э. Симсон, А. З. Хомич, А. А. Куриц и др. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.
19. Ротанов Н.А. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями : учеб. пособие / Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, В.В. Литовченко и др. – М.: Транспорт, 1991.– 336с.
20. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги : учеб. пособие / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров и др.; под общ. ред. И.П. Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 294с.
21. Сандлер А.С. Частотное управление асинхронными двигателями. : учеб. пособие / А.С. Сандлер, Р.С Сарбатов. – М.: Энергия, 1966. – 144 с.

22. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи : учебн. для ВУЗов ж.д. трансп. / А.Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
23. Ротанов Н.А. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. : учеб. пособие / Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков и др. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
24. Бабичков А.М. Тяга поездов и тяговые расчеты.: учеб. пособие / А.М Бабичков, П.А. Гурский, А.П. Новиков. – М.: Транспорт, 1971. – 280 с.
25. Осипов С.И. Основы электрической и тепловозной тяги.: учеб. пособие / С.И.Осипов. – М.: Транспорт, 1985. – 272с.
26. 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 «ХПІ», 2018. – С. 182.
27. Воронов А.А. Основы теории автоматического регулирования: учеб. пособие / А.А. Воронов. – М.: Энергия, 1980. – 357с.
28. Цукало П.В. Экономия электроэнергии на электроподвижном составе : учеб.пособие / П.В. Цукало. – М.: Энергия, 1983. – 172с.
29. 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.
30. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе : учеб. пособие / И.Е. Овчинников. – СПб.: КОРОНА-Век, 2006. – 336с.
31. Чиликин М.Г. Основы автоматизированного электропривода. : учеб. пособие / М.Г. Чиликин. – М.: Энергия, 1974. – 567 с.
32. Ключев В.И. Теория электропривода : учеб. для вузов / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

- 33.** Сенько В.І. Електроніка і мікросхемотехніка. Елементна база електронних пристроїв. : Підручник у 4-х томах / В.І. Сенько, за ред. В. І. Сенька. Т.1. – К.: Обереги, 2000. – 300 с.
- 34.** Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи : Учебник для вузов ж.д. транспорта. / А.Т. Бурков – М.: Транспорт, 2001. – 286 с.
- 35.** Чебовский О.Г. Силовые полупроводниковые приборы. : учеб.пособие / О.Г. Чебовский. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 391с.
- 36.** Терехов В.М. Системы управления электроприводов : Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – М.: «Академия», 2005 – 300 с.
- 37.** Терехов В.М. Системы управления электроприводов : Учебник для студ. высш. учеб. Заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; Под ред. В.М. Терехова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
- 38.** Фираго Б.И. Теория электропривода : Учеб. Пособие / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. -2-е изд. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
- 39.** Денис І. В. Порівняльний аналіз роботи традиційного та гібридного тепловозів / С. Г. Буряковський, А. С. Маслій, Д.П. Помазан, Н.В. Григоренко, І. В. Деніс // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. – Кременчук : КрНУ, 2018. – №5/2018 – С. 172.
- 40.** Банев Е.Ф. Энергоресурсосберегающий электропривод эскалатора метрополитена с фаззи регулятором : дис. к.т.н.: 05.09.03 / Е.Ф. Банев. Харьков, 2013. – 140 с.
- 41.** Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем / С.Г. Герман-Галкин – Санкт-Петербург: КОРОНА-принт, 2007. – 320с.
- 42.** Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSistems и Simulink / И.В. Черных – М.: ДМК Пресс. - 2008. – 288 с.
- 43.** Чорний О.П. Моделювання електромеханічних систем / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сісюк, О.В. Садовой – Кременчук, 2001. – 376 с.

44. Приймак Б.І. Нечітке керування електротехнічними об'єктами / Б.І. Приймак, М.М. Бондаренко, О.М. Халімовський // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №10. – С. 308-311.

45. 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.

46. Viřinka, R.: On-fly phase resistance estimation of switched reluctance motor for sensorless based control techniques, Ph.D Thesis, Brno, 2002.

47. Viorel I.A., Strete L., Husain I.: An analytical model of switched reluctance motor based on magnetic field analysis results, Proc. of 3rd Int. Symp. on Electrical Engineering and Energy Converters – Romania. – 2009. – P. 97-100.

48. Martin MANA: Mathematical model switched reluctance motor, Dept. of Power Electrical and Electronic Engineering, 2010 – p.25.

49. Голландцев Ю.А., Вентильные индукторно-реактивные двигатели / Голландцев Ю.А – Санкт-Петербург: Издательство центрального научно-исследовательского института «Электроприбор», 2003. – с. 147.

50. Direct drive systems with transverse flux reluctance motors / Ioan-Adrian Viorel, Mircea Crivii, Lars Löwenstein, Loránd Szabó, Mircea Gutman.: Romsnia – Acta Electrotehnica. – 2004. – №3.

51. Рябов Е.С., Реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2010. – № 38. – С. 80–83.

52. Miller T.J., Optimal Design of Switched Reluctance Motors / IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2002 –№49 – P.15–27.

53. Manesh Krishnamurty, Chris S Edrington, Ali Emadi, Peyman Asadi, Mehrdad Fahimi, Babak Fahimi. Making the Case for Application of Switched Reluctance Motor Technology in Automotive Product / IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 21, no. 3, pp. 659–675, May 2006.

- 54.** David Meeker, Finite Element Method Magnetics / User's Manual, Version 3.4 // 2004 – p.79.
- 55.** Ракитин В.И. Практическое руководство по методам вычислений / В.И. Ракитин, В.Е. Первушин // Учебное пособие – М.: Высш. школа, 1998. – с. 383.
- 56.** Ильинский Н.Ф., Вентильно - индукторный привод для легких электрических транспортных средств / Н. Ф. Ильинский, М. Г. Бычков // Электро-техника. – 2000. – № 2. – С. 28 – 31.
- 57.** Denys I. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of a hybrid diesel locomotive / S. Buriakovskiy, M. Babaiev, B Liubarskyi, N. Karpenko, Ar.Maslii, D. Pomazan, An. Maslii, I. Denys // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2018. – №1/2 (91). – С. 68-75.
- 58.** Мнускін Ю. В. Вентильний реактивний двигун з програмним формуванням вихідних характеристик : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / Ю. В. Мнускін. – Донецьк, 2006. – 20 с.
- 59.** Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: Пер. с англ / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
- 60.** M.Balaji, V.Kamaraj. Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm // European Journal of Scientific Research, Vol.47 No.2 (2010), pp.187-196.
- 61.** Буряковский С.Г., Улучшение динамических характеристик главного привода блюминга в режиме пробуксовки валков: автореф. дис. на получение науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Электропривод». / С.Г. Буряковский. – Харьков: НТУ“ХПИ” 1993. – 17 с.
- 62.** Соколовский Г.Г., Управление электроприводами. / Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
- 63.** Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. / Соколовский Г.Г., Борцов Ю.А. – Л.: Энергия, 1979. – С. 156.

- 64.** Иващенко Н.Н., Автоматическое регулирование. / Иващенко Н.Н. - Москва: Машиностроение, 1978. – 736с.
- 65.** Krishnan R. Switched reluctance motor drives. Modeling. Simulation, Analysis, Design and Applications / Krishnan R. - CRC Press, 2001. – 398 p.
- 66.** Акимов Л. В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой / Л. В. Акимов, В. Т. Долбня, В. Б. Клепиков – Харьков : НТУ «ХПИ», 2002. – 159 с.
- 67.** Уайт Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон – Москва: Издательство «Энергия», 1964. – 528 с.
- 68.** Седов В. И. Расчет магнитного поля и электромагнитного момента индукторного электродвигателя методом конечных элементов / В. И. Седов, Л. Д. Лушникова // Электровозостроение: сб. научн. тр. – ОАО «ВЭЛНИИ», 2005. – Т. 48. – С. 25-32.
- 69.** David M. Finite Element Method Magnetics. User's Manual / M. David – 2004. – Version 3.4 – 79 p.
- 70.** Рымша В. В. Усовершенствованная цепно-полевая модель вентильно-реактивного двигателя / В. В. Рымша, И. Н. Радимов, М. В. Гулый, П. А. Кравченко // Електротехніка і електромеханіка.– 2010.– № 5. – С. 24-26.
- 71.** Данилов Ю. А. Многочлены Чебышева / Ю. А. Данилов. – Минск : Высшая школа, 1984. – 157 с.
- 72.** Буряковский С. Г. Идентификация параметров математической модели вентильно-индукторного трехфазного двигателя непрерывными функциями на основе полиномов Чебышева на множестве равноудаленных точек / С. Г. Буряковский, А. С. Маслий, Б. Г. Любарский // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук : КрНУ, 2012. – № 3 (19) – С. 605-606.
- 73.** Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи / А. Т. Бурков. – Москва : Транспорт, 1999. – 464 с.
- 74.** Рымша В. В. Моделирование и синтез реактивных и индукторных электромеханических преобразователей: дис. д-ра техн. наук : 05.09.01 / Виталий Викторович Рымша. – Одесса, 2004. – 336 с.

75. Гулый М. В. Вентильно-реактивный электродвигатель для аппаратов искусственной вентиляции лёгких: дис. канд. техн. наук : 05.09.01 / Михаил Викторович Гулый, – Одесса, 2010. – 169 с.

76. Иглин С. П. Теория вероятности и математическая статистика на базе MATLAB. / С. П. Иглин. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. – 612 с.

77. Офіційний сайт компанії «International Rectifier». URL: www.irf.com (дата звернення : 25.06.2018).

78. Круглов В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 221 с.

79. Маслий А. С. Микропроцессорный вентильно-индукторный электропривод стрелочного перевода моношпального типа : дис. канд. техн. наук : 05.09.03 «Электротехнические системы и комплексы» / Артём Сергеевич Маслий. – Харьков, 2014. – 192 с.

80. Смирнов В. В. Синтез системы управления регулируемого электропривода стрелочного перевода как многомассовой электромеханической системы : дис. канд. техн. наук : 05.09.03 «Электротехнические системы и комплексы» / Василий Васильевич Смирнов. – Харьков, 2012. – 219 с.

81. Седов В. И. Аналитический метод расчёта магнитной проводимости зазора реактивного индукторного двигателя / В. И. Седов, Д. А. Леонов // Электровозостроение: сб. научн. тр. ОАО «Всерос. научно-исслед. и проектно-конструктр. ин-т электровозостроения». – 2001. – Т.43. – С. 73-81.

82. Клепиков В. Б. Автоматизированные электромеханические системы с модальными регуляторами и наблюдателями состояния / В. Б. Клепиков, Л. В. Акимов // Сб. научных статей. – Харьков : ХГПУ, 1997. – 89 с.

83. Акимов Л. В. Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния / Л. В. Акимов, В. И. Колотило, В. С. Марков. – Харьков : ХГПУ, 2000. – 93 с.

84. Буряковский С. Г. Применение нетрадиционных регуляторов скорости для улучшения динамических характеристик стрелочного железнодорожного

перевода / Л. В. Акимов, С. Г. Буряковский, В. В. Смирнов // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 3. – С. 70-74.

85. Банев Е. Ф. Энергоресурсосберегающий электропривод эскалатора метрополитена с фаззирегулятором: дис. канд. техн. наук : 05.09.03 «Электротехнические системы и комплексы» / Евгений Федорович Банев. – Харьков, 2013. – 140 с.

86. Буряковский С. Г. Синтез регуляторов скорости вентильно-индукторного электропривода стрелочного перевода / С. Г. Буряковский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків : УкрДАЗТ. – 2014. – № 1 (104). – С. 31-40.

87. Вадутов О. С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера-Никольса. Методические указания по выполнению лабораторных работ «Томский политехнический университет» / О. С. Вадутов. – Томск : «ТПУ», 2013. – № 10. – С. 10-15.

88. Маслий Ан. С. Разработка и исследование системы управления вентильно-индукторным электродвигателем / С. Г. Буряковский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий, Б. Г. Любарский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків : УкрДАЗТ, 2013. – № 5 (102). – С. 68-74.

89. Маслий Ан. С. Синтез регуляторов скорости вентильно-индукторного электропривода стрелочного перевода / С. Г. Буряковский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків : УкрДАЗТ, 2014. – № 1 (104). – С. 31-40.

90. Маслий Ан. С. Разработка и исследование системы управления вентильно-реактивным электродвигателем / С. Г. Буряковский, Б. Г. Любарский, Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2013. – Вип. 36. – С. 195-197.

91. Офіційний сайт компанії «Microchip Technology Inc». URL: <http://www.microchip.com> (дата звернення : 21.01.2018).

92. Маслий Ан. С. Исследование адекватности математической модели вентильно-индукторного двигателя / Ар. С. Маслий, Ан. С. Маслий // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – Харків : УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 54-60.

ДОДАТКИ

Додаток А — Схеми, моделі та структури, що не ввійшли до
основного змісту дисертації

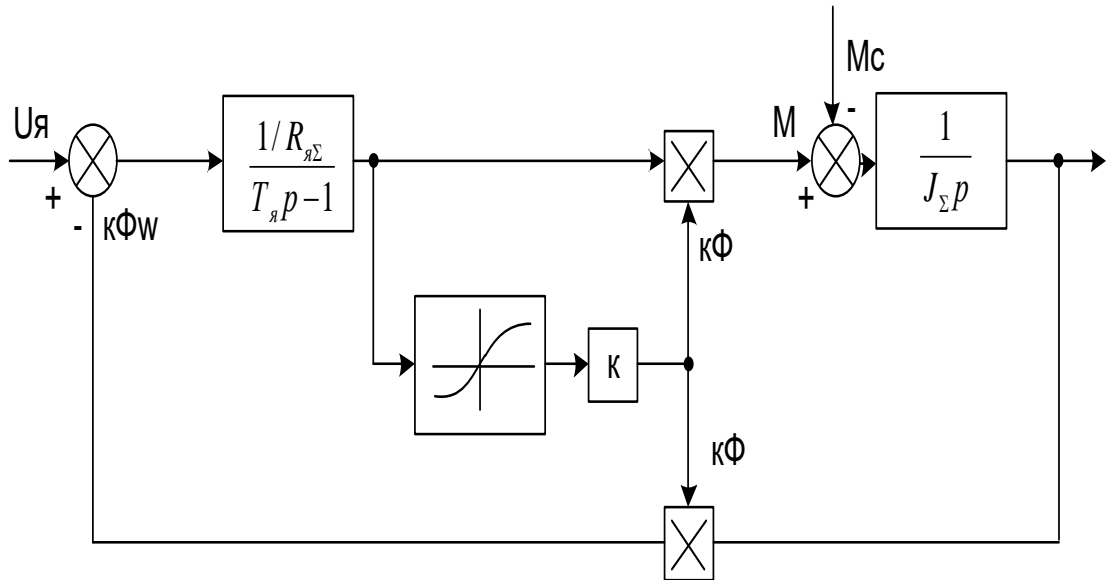


Рисунок А.1 — Структурна схема електропривода постійного струму з
двигуном послідовного збудження.

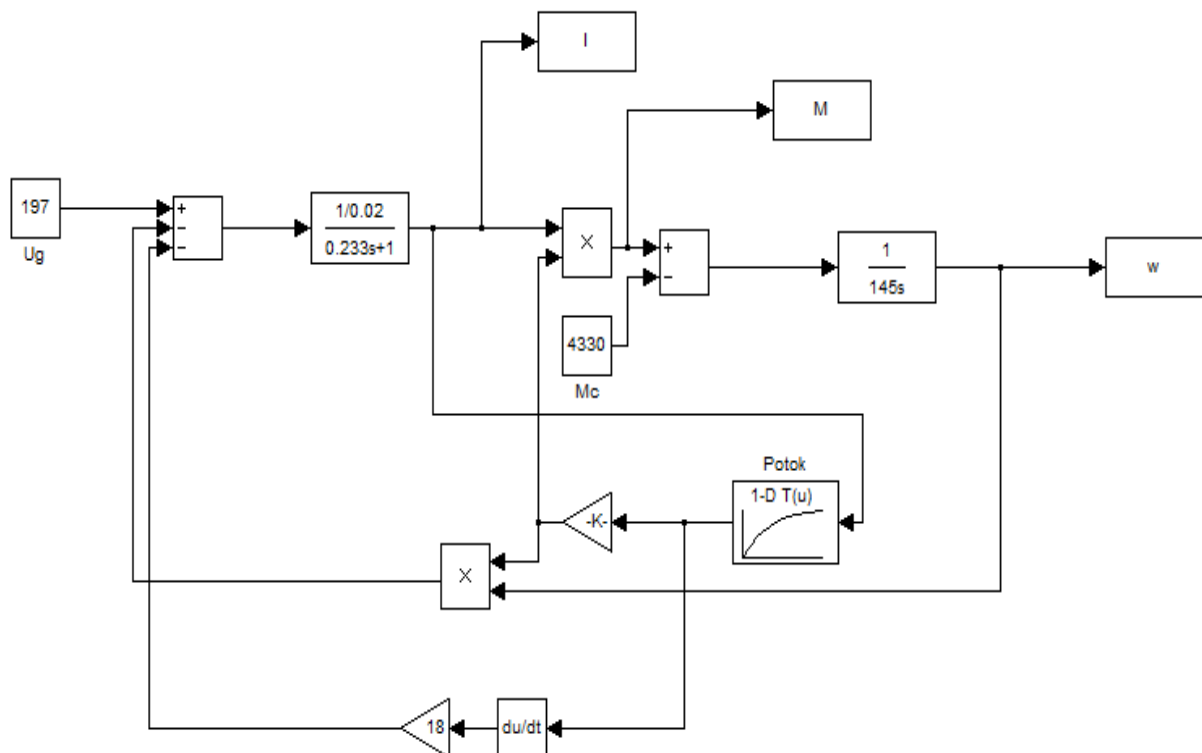


Рисунок А.2 – Математична модель двигуна постійного струму послідовного
збудження

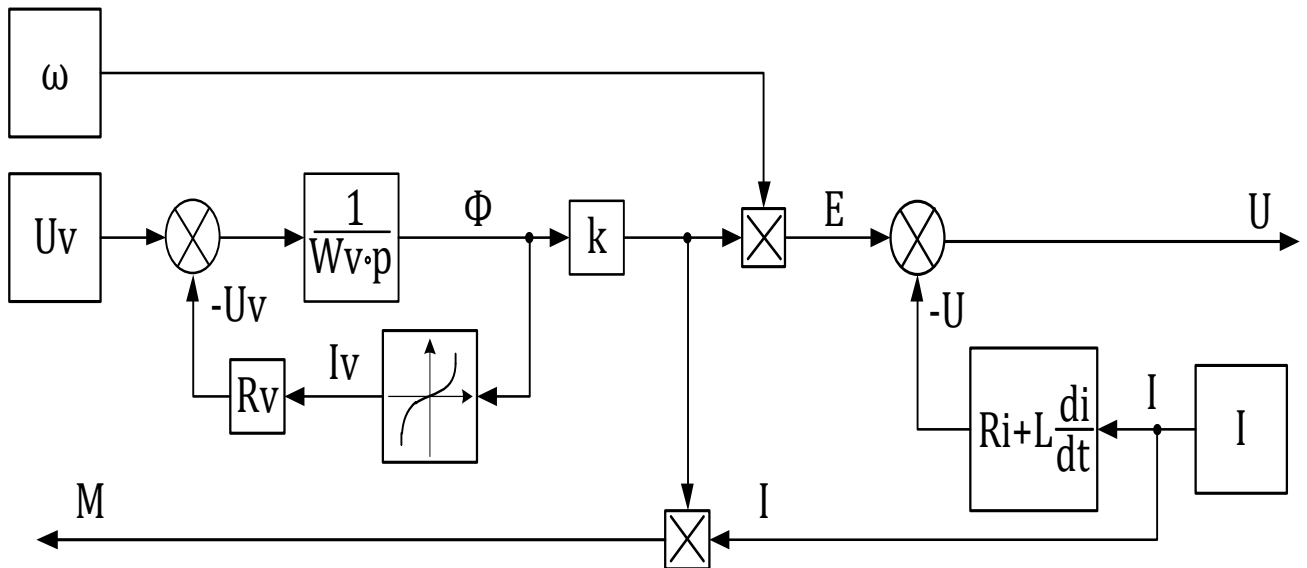


Рисунок А.3 - Структурна схема генератора постійного струму з незалежним збудженням

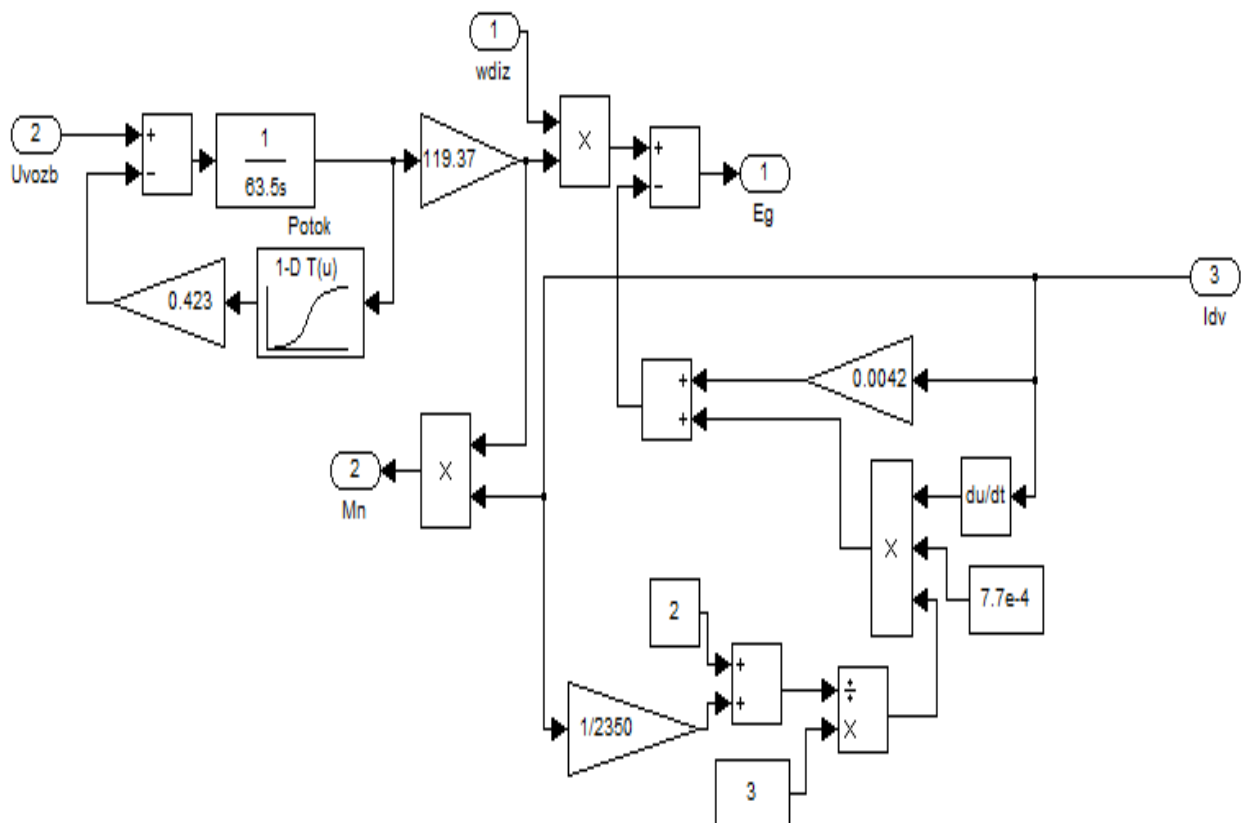


Рисунок А.4 - Математична модель генератора постійного струму з незалежним збудженням

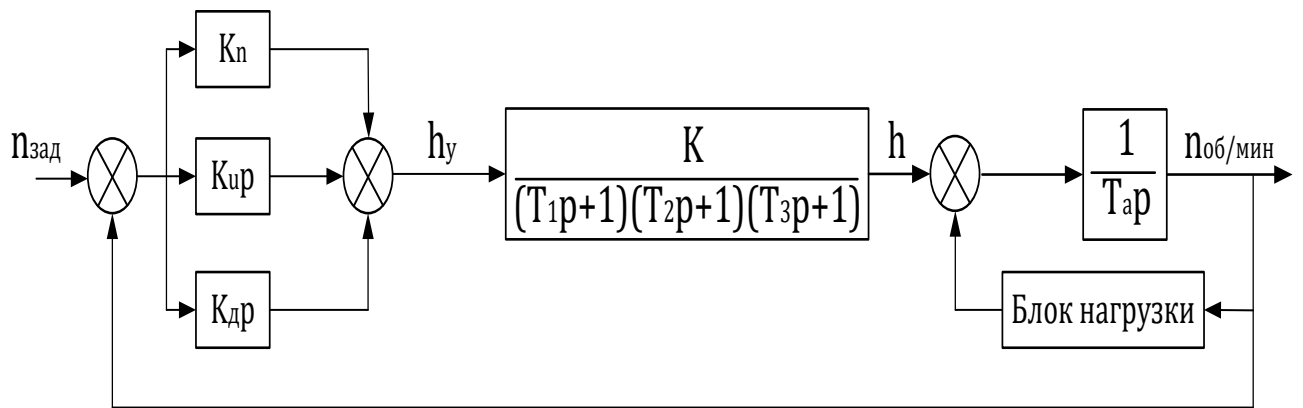


Рисунок А.5 - Реалізація ПІД-регулятора при послідовному з'єднанні його ланок

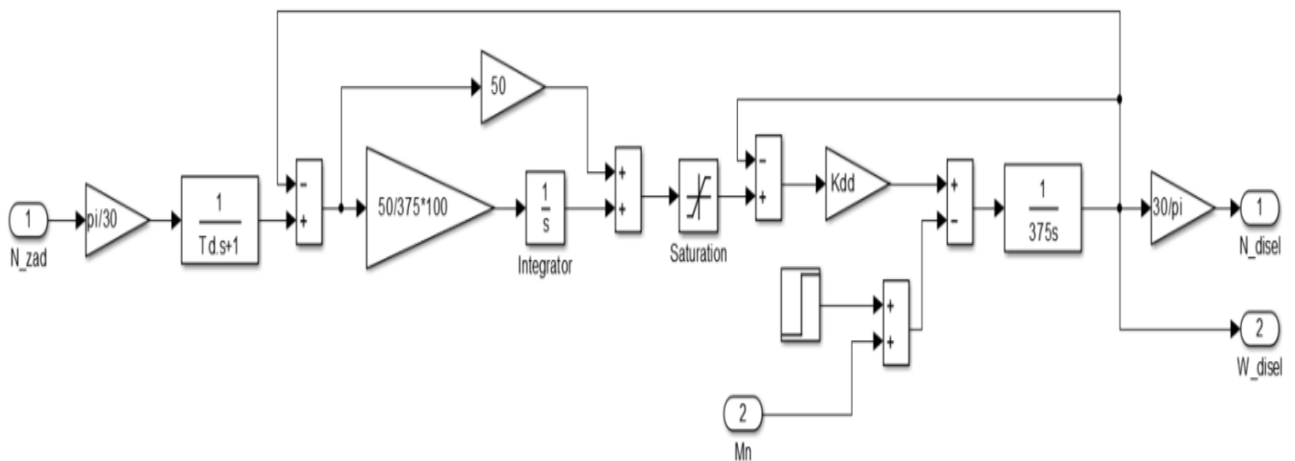


Рисунок А.6 - Математична модель дизеля K6S310DR тепловоза ЧМЕЗ

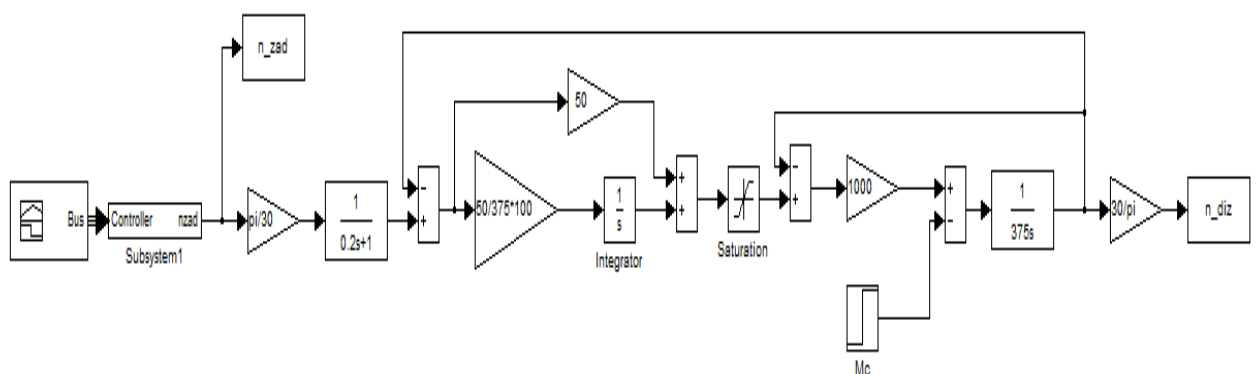


Рисунок А.7- Математична модель дизелю, що регулюється

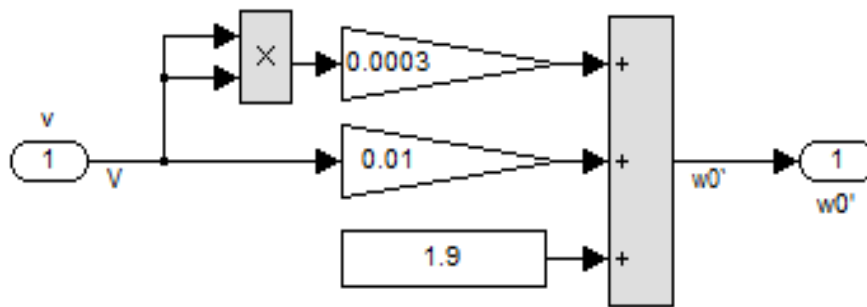


Рисунок А.8 – Структура моделі блоку, що обчислює питомий опір руху
ЛОКОМОТИВА

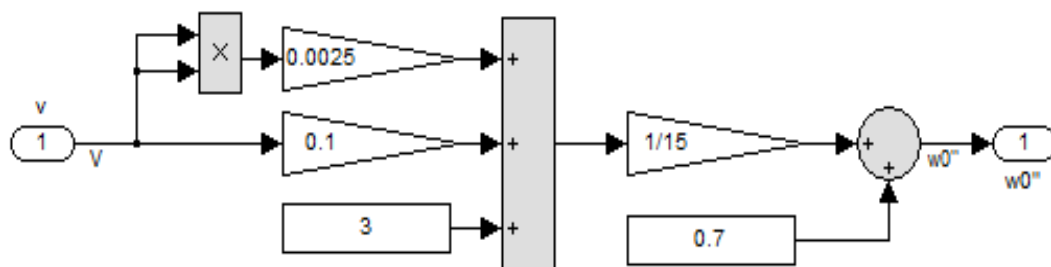


Рисунок А.9 – Структура моделі блоку, що моделює питомий опір складу

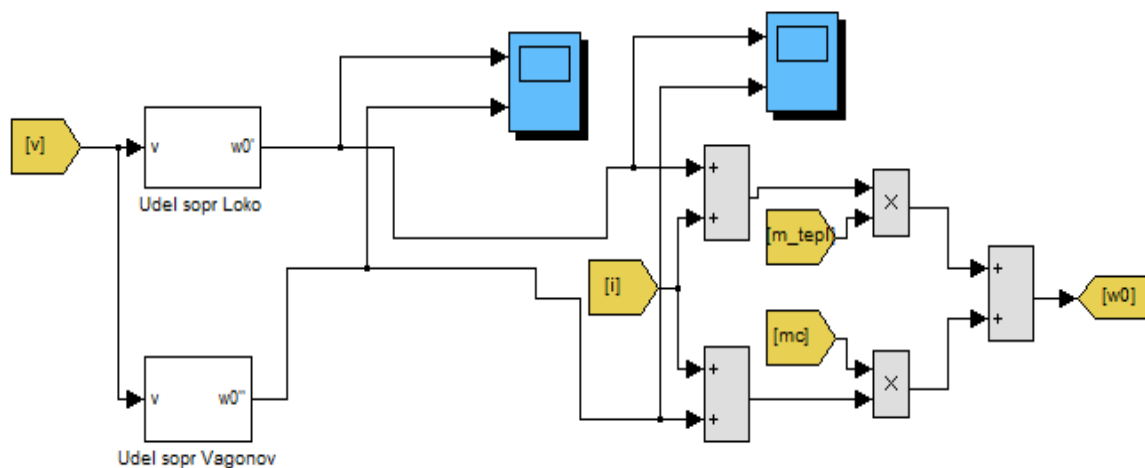


Рисунок А.10 – Структура блоку, що моделює питомий опір потяга

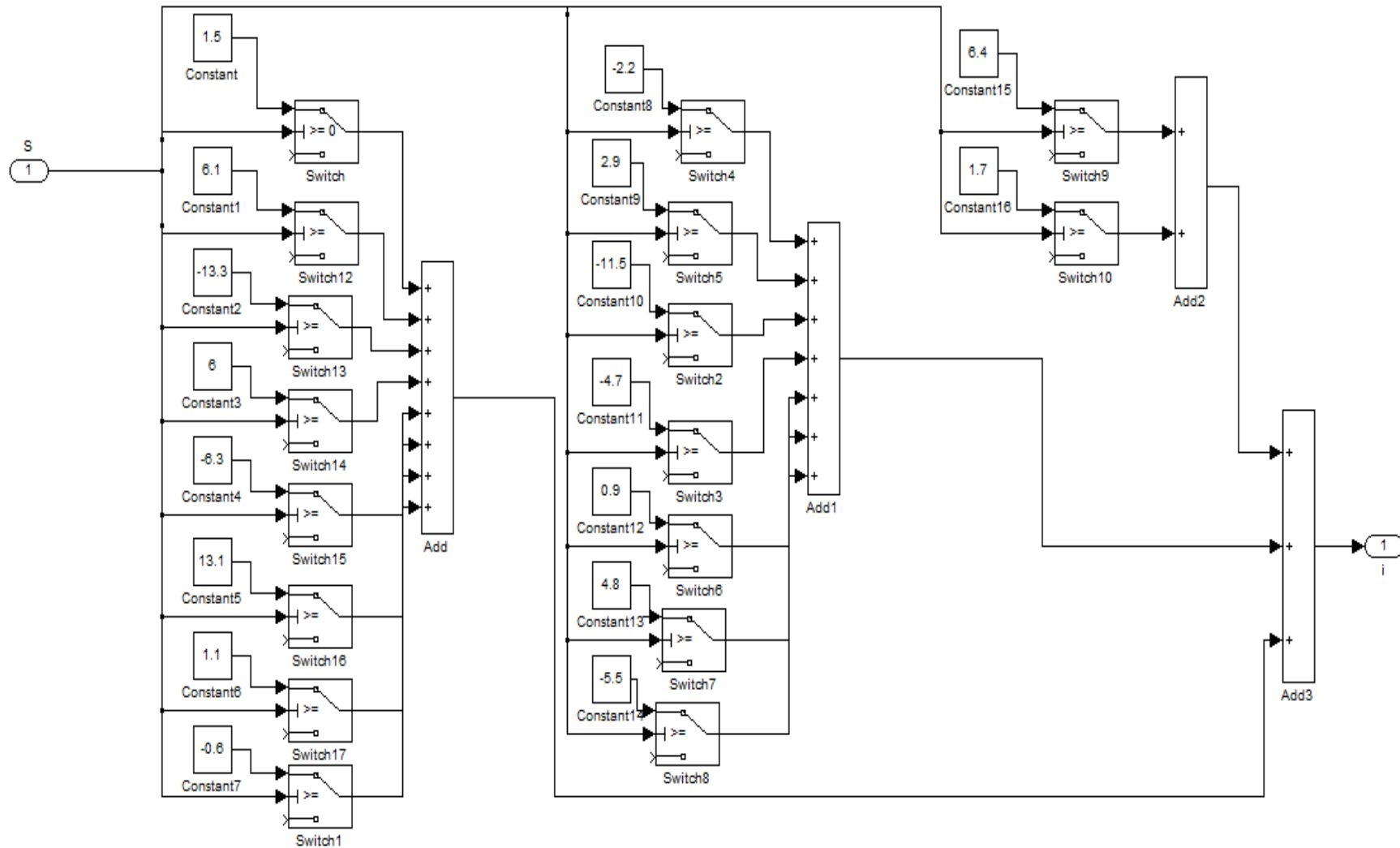


Рисунок А.11 – Структура підсистеми формування профілю шляху

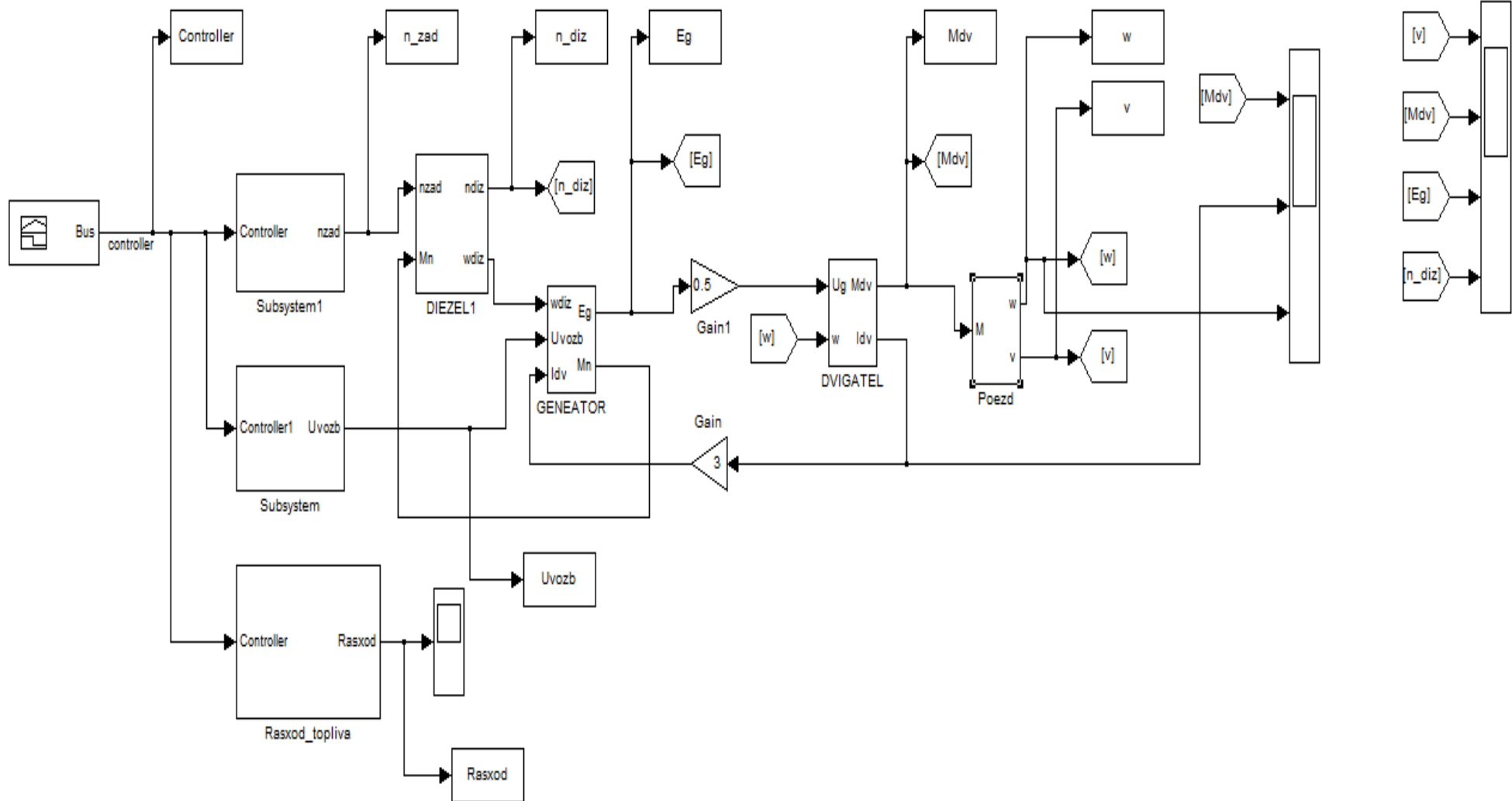


Рисунок А.12 – Загальний вид математичної моделі руху поїзда з тепловозом ЧМЕЗ

Додаток Б — Список публікацій здобувача та відомості про апробацію результатів дисертації

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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, B 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 «ХПІ», 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.

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

LIST OF PUBLICATIONS

Publication where the main scientific results of the dissertation are published:

1. Denys I. V. Konceptualnuy proect manevrovogo teplovoza novogo pokoleniya/S. G. Buryakovskiy//Mejdunarodnuy profesionaknuy jurnal «Lokomotivinform» № 11-12 (113-114) 2015 C. 7-11

2. Denys I. V. Obgruntuvannya neobhidnosti modernizaciyi teplovozu ChME3 iz vykorystanniam gibrydnoyi sylovoyi ustanovky/S. G. Buryakovskiy, A. S. Maslij, D. P. Pomazan, I. V. Denys//Elektryfikaciya transportu. – Dnipro: DNUZT, 2016. – №12. – S. 82-85.

3. Denys I. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of a hybrid diesel locomotive/S. Buriakovskiy, M. Babaiev, B Liubarskiy, N. Karpenko, Ar. Maslii, D. Pomazan, An. Maslii, I. Denys// Shidno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologiy. – 2018. – №1/2 (91). – C. 68-75.

4. Denys I. V. Doslidzhennya rezhymiv roboty teplovoza ChME3 na imitacijnij modeli/S. G. Buryakovskiy, A. S. Maslij, V. V. Panchenko, D. P. Pomazan, I. V. Denys//Elektrotexnika i elektromexanika. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. – №2018/2. – S. 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. – S. 69-80.

Published works of approbatory character:

6. Denis I. V. Sistema upravlinnya manevrovim teplovozom z gIbridnim privodom / S. G. Buryakovskiy, I. V. Denis // Problemi peretvorenniya elektroener-gIYi na elektrichnomu transportI. – HarkIv: SemInar NAN UkraYini, 2013-2015.

7. Denys I. V. Doslidzhennya rezhymiv roboty teplovoza ChME3 za dopomogoyu imitacijnoyi modeli/S. G. Buryakovskiy, A. S. Maslij, D.P. Pomazan, I. V. Denys//Informacijni tehnologiyi: nauka, technika, tehnologiya, osvita, zdorovya: tezy dopovidej XXVI mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferenciyi MicroCAD-2018. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2018. – S. 182.

8. Denys I. V. Porivnyalnyj analiz roboty tradycyjnogo ta gibrydnogo teplovoziv/S. G. Buryakovskij, A. S. Maslij, D.P. Pomazan, N. V. Grygorenko, I. V. Denys//Problemy energoresursozberezhennya v elektrotexnichnyh systemax. Nauka, osvita i praktyka. – Kremenчук: KrNU, 2018. – №5/2018 – S. 172.

Testing the results of the thesis. The main results of the work were reported and discussed at international conferences and seminars: "The Problems of Transformation of Electricity in Electric Transport" Annual Seminar of NAS of Ukraine (Kharkiv, 2013-2015); «Information Technology: Science, Technology, Technology, Education, Health: Abstracts of the XXVI International Scientific Conference MicroCAD-2018» (Kharkov, 2018); «Problems of energy saving in electrical systems. Science, education and practice» (Kremenчуг, 2018).

Publications. The results of the dissertation are published in 7 scientific works, 5 of them - in scientific professional editions of Ukraine (4 - in publications belonging to international scientometric bases), 3 - in periodical professional publications (Scopus and Web of Science), 3 - in materials conferences.

Додаток В — Акт про використання результатів дисертаційної роботи



04655, м. Київ, вул. Старокиївська, 10-Г
ЄДРПОУ 38620030; Р/р 26001567161800
в АТ «Укрсиббанк», МФО 351005
Тел. +380 (068) 203 – 63 – 07

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Дениса Ігоря Володимировича на тему «Покращення динамічних показників роботи гібридного тепловозу з вентиляно-індукторним приводом», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 — рухомий склад залізниць і тяга поїздів

Результати дисертаційної роботи Дениса Ігоря Володимировича використовуються нашим технічним відділом при вирішенні таких питань:

1. Створення імітаційної моделі тепловоза, розрахунку індикаторної діаграми дизеля K6S310DR та отримання неперервних залежностей тиску та сили, що діють на поршень.
2. Синтез двох типів регуляторів швидкості (модального та на основі нечіткої логіки) вентиляно-індукторного приводу
3. Визначенні параметрів системи керування гібридним тепловозом з вентиляно-індукторним приводом.
4. Створення імітаційних моделей дизельних двигунів та накопичувачів енергії, що враховують нелінійність таких елементів.
5. Розробка заходів з підвищення якості і ефективності експлуатації та технічного обслуговування і ремонту тепловозів, що використовують гібридну силову установку.

Враховуючи рівень отриманих результатів ТОВ «ФТС» планує і надалі співпрацювати з Денисом Ігорем Володимировичем та використовувати його наробітки та дослідження.

Директор



Р. А. Широкопояс



Товариство з обмеженою відповідальністю
ТРАНС-ГРУП ПЛЮС
 25013, м. Кіровоград, вул. Гореза, 27, оф 1., Код ЄДРПОУ 31844975 Свідоцтво плати. ПДВ 200070946
 Р/р 26003962504602 в ПАТ «Приватбанк» МФО305308 ПІН 318449711230 тел. +38 (096)102 01 15 E-mail: t-gp@mail.ru

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Дениса Ігоря Володимировича на тему «Покращення динамічних показників роботи гібридного тепловозу з вентильно-індукторним приводом», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 — рухомий склад залізниць і тяга поїздів

Наше підприємство Товариство з обмеженою відповідальністю «ТРАНС-ГРУП ПЛЮС» вже не вперше співпрацюємо з Денисом Ігорем Володимировичем та використовує його наукові нароби в сфері ремонту, обслуговування та дослідження роботи тепловозів. Результати дисертаційної роботи використані при вирішенні наступних завдань:

1. Створення імітаційної моделі тепловоза та дослідження його роботи на реальному профілю шляху ділянки.
2. Створення математичних моделей вентильно-індукторних двигунів як об'єктів керування з урахуванням особливостей роботи в поєднанні з гібридною системою;
3. Визначенні параметрів системи керування гібридним тепловозом з вентильно-індукторним приводом.
4. Створення імітаційних моделей дизельних двигунів та накопичувачів енергії, що враховують нелінійність таких елементів.
5. Розробка заходів з підвищення якості і ефективності експлуатації та технічного обслуговування і ремонту тепловозів, що використовують гібридну силову установку.

Директор
ТОВ «ТРАНС-ГРУП ПЛЮС»



Тодоренко О. М.