

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

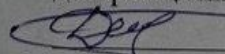
ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МАНЕВРОВОГО
ТЕПЛОВОЗА ЧМЕЗ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи

KPM.273.18.01.25.01 ПЗ

Розробив: студент групи 214-ЕЕП-324
спеціальності 273 «Залізничний транспорт»
освітньої програми «Електровози та
електропоїзди»

(роботу виконано самостійно, відповідно
до принципів академічної доброчесності)

 Денис КОСТЕНКО

Керівник: к.т.н., доцент
Андрій МАСЛІЙ

Рецензент: к.т.н., доцент
Олександр ОБОЗНИЙ

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет: механіко-енергетичний

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

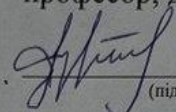
Другий (магістерський) рівень вищої освіти

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

Освітня програма: «Електровози та електропоїзди»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук

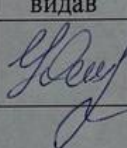
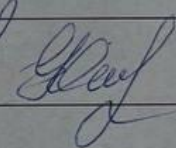
 Михайло БАБАШ
(підпис)
«__» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**
Костенка Дениса Олександровича

- 1 Тема «Підвищення енергоефективності маневрового тепловоза ЧМЕЗ шляхом застосування накопичувачів енергії»,
керівник Маслій Артем Сергійович, к.т.н., доцент,
затверджені розпорядженням по механіко-енергетичному факультету
від 24 лютого 2025 року № 18/25.
- 2 Строк подання студентом закінченої роботи 05 січня 2026 року.
- 3 Вихідні дані: маневровий тепловоз ЧМЕЗ, чотиритактний шестициліндровий дизельний двигун K6S310DR, тяговий двигун ТЕ-006, тяговий генератор DT-802.
- 4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки
 - 1) Загальна характеристика тепловоза ЧМЕЗ та його модернізацій
 - 2) Математичне моделювання роботи тепловозу ЧМЕЗ
 - 3) Розробка та моделювання гібридної системи з двигунами постійного струму
 - 4) Імітаційне моделювання асинхронного привода
 - 5) Математичне моделювання гібридного тепловоза з асинхронним приводом
 - 6) Визначення економічного ефекту від застосування гібридної силової установки на тепловозі ЧМЕЗ
- 5 Перелік графічного матеріалу
 - 1) Загальний вид тепловозу ЧМЕЗ – один слайд (формат А4).
 - 2) Структурна схема моделі тепловозу ЧМЕЗ – два слайди (формат А4).
 - 3) Структурні схеми основних вузлів тепловоза ЧМЕЗ – один слайд (формат А4).
 - 4) Результати моделювання – один слайд (формат А4).

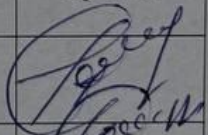
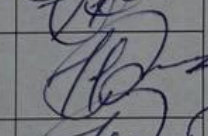
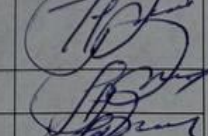
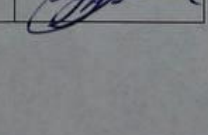
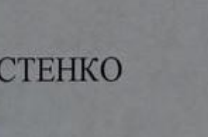
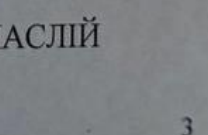
- 5) Режими роботи маневрових тепловозів – один слайд (формат А4).
- 6) Перспективи застосування гібридних силових установок на тепловозі ЧМЕЗ – один слайд (формат А4).
- 7) Функціональна схема роботи модернізованого гібридного тепловоза – один слайд (формат А4).
- 8) Моделювання накопичувачів енергії – один слайд (формат А4).
- 9) Моделювання прямого пуску асинхронного двигуна ТМЕ 42-15 – один слайд (формат А4).
- 10) Математичне моделювання асинхронного двигуна з векторним керуванням – один слайд (формат А4).
- 11) Осцилограми роботи гібридного локомотива – один слайд (формат А4).
- 12) Витрати пального на роботу локомотива за роками – один слайд (формат А4).
- 13) Висновки до роботи – один слайд (формат А4).

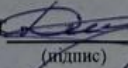
6 Консультанти окремих розділів

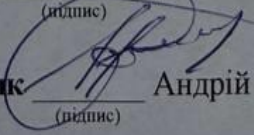
Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Уткіна Ю.М., доцент, канд. екон. наук		

7 Дата видачі завдання: 06 жовтня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1 Отримання завдання на кваліфікаційну роботу. Формування змісту та етапів роботи.	06.10-12.10.25	
2 Збирання та обробка статистичної інформації.	13.10-23.10.25	
3 Виконання роботи по розділам кваліфікаційної роботи.	24.10-23.12.25	
4 Перевірка виконаних завдань у керівника кваліфікаційної роботи, виправлення помилок.	24.12-26.12.25	
5 Робота над оформленням графічної частини.	27.12-31.12.25	
6 Нормоконтроль. Підготовка до захисту.	01.01-05.01.26	

Студент  Денис КОСТЕНКО

Керівник  Андрій МАСЛІЙ

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 117 аркушів пояснювальної записки формату А4, у тому числі 49 рисунків, 16 таблиць, 12 літературних джерел.

Ключові слова: тепловоз, дизельний двигун, асинхронний електродвигун, частотний перетворювач, система керування.

Об'єктом дослідження є модернізована тягова електрична передача маневрового тепловоза ЧМЕЗ.

Метою дослідження є дослідження ефективності роботи гібридної системи з різними типами приводів.

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження можливостей модернізації маневрового тепловоза ЧМЕЗ шляхом упровадження гібридної тягової системи. Така система поєднує дизельний двигун малої потужності, тяговий синхронний генератор, електрохімічні накопичувачі енергії та асинхронні тягові електродвигуни, що керуються перетворювачами частоти. Метою роботи є оцінювання ефективності функціонування гібридної силової установки в порівнянні з базовою електричною передачею тепловоза. У дослідженні визначено об'єктом модернізовану тягову електричну передачу тепловоза ЧМЕЗ. Виконано аналіз енергоефективності, динамічних характеристик та особливостей керування обома варіантами силової установки під час руху на заданій ділянці шляху. У роботі наведено 49 рисунків, 16 таблиць та використано 12 літературних джерел, що дозволяє всебічно оцінити переваги й недоліки запропонованої гібридної конфігурації. Результати показують потенціал зниження енергоспоживання, підвищення коефіцієнта корисної дії та оптимізації режимів роботи маневрового тепловоза. Отримані висновки можуть бути використані під час розроблення модернізованих тягових систем для маневрового і промислового рухомого складу..

ABSTRACT

This qualification paper includes 117 sheets of A4 explanatory note, including 49 pictures, 16 tables, 12 literary sources.

Keywords: ocomotive, diesel engine, asynchronous electric motor, frequency converter, control system

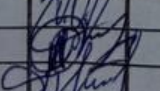
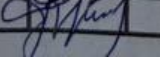
The object of research is a modernized traction electric transmission of a shunting diesel locomotive ЧМЕ3.

The aim of research is studying the performance of a hybrid system with different types of drives.

This master's thesis presents a comprehensive study on the modernization of the CHME3 shunting locomotive through the implementation of a hybrid traction system. The proposed system integrates a low-power diesel engine, a synchronous traction generator, electrochemical energy storage devices, and asynchronous traction motors controlled by frequency converters. The primary objective of the research is to evaluate the operational efficiency of the hybrid powertrain in comparison with the locomotive's baseline electric transmission. The object of the study is the modernized traction electric transmission of the CHME3 locomotive. The thesis examines energy efficiency, dynamic performance, and control features of both the original and hybrid configurations when operating along a selected track section. The work includes 49 figures, 16 tables, and references 12 literary sources, providing a detailed and substantiated analysis of the proposed hybrid solution. The results demonstrate the potential for reducing energy consumption, improving overall efficiency, and optimizing operating modes of the shunting locomotive. The findings may be applied in the design and modernization of traction systems for shunting and industrial rolling stock.

Зміст

Вступ	7
1 Загальна характеристика тепловоза ЧМЕЗ та його модернізацій	9
2 Математичне моделювання роботи тепловозу ЧМЕЗ	14
2.1 Математичне моделювання двигуна постійного струму ТЕ-006	14
2.2 Математичне моделювання генератора постійного струму TD-802	25
2.3 Математичне моделювання збуджувача тягового генератора	34
2.4 Математичне моделювання дизеля	36
2.5 Математичне моделювання руху поїзда	51
3 Розробка та моделювання гібридної системи	58
3.1 Вибір та обґрунтування функціональної схеми гібридного тепловоза	60
3.2 Математичне моделювання системи Г-Д	64
3.3 Імітаційне моделювання накопичувачів енергії	69
4 Імітаційне моделювання асинхронного привода	75
5 Математичне моделювання гібридного тепловоза з асинхронним приводом	95
6 Визначення економічного ефекту від застосування гібридної силової установки на тепловозі ЧМЕЗ	99
6.1 Коротка характеристика запропонованого рішення	99
6.2 Методика розрахунку економічного ефекту	100
6.3 Розрахунок економічного ефекту від впровадження гібридної силової установки з асинхронними двигунами	103
Висновки	114
Список використаних джерел	116
Додаток	117

					КРМ.273.18.01.25.01 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Костенко			Покращення енергетичних показників маневрового тепловоза ЧМЕЗ шляхом застосування гібридної системи	Літ.	Арк.
Перевір.		Маслій					Аркушів
Рецензент		Обозний				6	117
Н. Контр.		Маслій				УкрДУЗТ кафедра ЕТЕМ	
Затверд.		Бабаєв					

Вступ

Залізничний транспорт став одним із найважливіших винаходів людства, що докорінно змінив економічний і соціальний розвиток багатьох країн. Поява перших залізниць у світі на початку XIX століття була зумовлена швидким розвитком промисловості та потребою в ефективному перевезенні вантажів і пасажирів. Першу лінію загального користування відкрили 27 вересня 1825 року в Англії між містами Стоктон і Дарлінгтон (довжиною 56 км). Незабаром подібні залізничні шляхи почали з'являтися і в інших європейських країнах — у Франції, Німеччині, Бельгії та Італії.

Необхідність створення залізничного транспорту на українських землях визріла природним шляхом — через потребу у швидкому перевезенні продукції сільського господарства та промисловості, а також завдяки вигідному географічному положенню регіону. Україна, маючи великі родовища корисних копалин і родючі землі, потребувала ефективних транспортних шляхів для розвитку внутрішньої та зовнішньої торгівлі.

Одними з перших напрямів, де активно розгорталося будівництво залізниць, стали промислові райони Донбасу та Криворіжжя, а також шляхи до морських портів Чорного й Азовського морів. Поступово формувалися три головні осередки залізничної мережі — Південно-Західна, Донецька та Південна. Вони забезпечили зв'язок промислових центрів, морських портів та аграрних регіонів між собою.

Однією з перших спеціалізованих залізниць в Україні стала лінія Костянтинівка – Єленівка, відкрита 1872 року для вивезення вугілля з Донбасу. У 1884 році завершено будівництво Катерининської залізниці, що об'єднала промислові райони Кривого Рогу з транспортними вузлами на Дніпрі. У наступні десятиліття продовжувалось спорудження нових напрямків, зокрема Херсон – Апостолове, Дніпро – Апостолове, Прилуки –

Чернігів – Овруч. До початку XX століття залізнична мережа України сформувалася як важлива складова економічної інфраструктури.

У першій половині XX століття залізничний транспорт зазнав значних руйнувань під час воєн, але вже в післявоєнні роки почалося масштабне відновлення колій, мостів і депо. У повоєнний період активно розвивалося будівництво нових вокзалів, модернізувались ремонтні підприємства, впроваджувались автоматичні системи блокування руху, гальмування та зчеплення вагонів.

У другій половині XX століття українські залізниці почали перехід від паровозної до електричної та тепловозної тяги. Поступово з'явилися сучасні електрифіковані ділянки, розбудовувалась мережа двоколійних і багатоколійних шляхів. Важливим етапом розвитку стало відкриття метрополітену у Києві (1960 рік), а згодом — у Харкові (1975 рік), що стало новим кроком у міському транспортному будівництві.

Наприкінці XX — на початку XXI століття українські залізниці перетворилися на одну з найрозвиненіших транспортних систем Східної Європи. Вони забезпечують більшість вантажних і пасажирських перевезень країни, відіграють ключову роль у міжнародній логістиці та сполученні між державами Європи й Азії.

Сьогодні залізнична інфраструктура України продовжує модернізуватись: триває електрифікація нових напрямків, удосконалюються системи керування рухом поїздів, впроваджуються енергозберігаючі технології, розвиваються швидкісні магістралі. Завдяки цьому українські залізниці залишаються стратегічним елементом транспортної системи держави, що забезпечує стабільність економіки та мобільність суспільства.

1 Загальна характеристика тепловоза ЧМЕЗ та його модернізацій

Тепловоз серії ЧМЕЗ — це шестивісний маневровий локомотив із електричною передачею потужності, розроблений і виготовлений у Чехословаччині підприємством ŠKD Praha. Його осьова формула — Co–Co (3o–3o), що означає наявність шести рушійних осей, кожна з яких приводиться в рух індивідуальним тяговим електродвигуном.

Необхідність створення потужнішого маневрового тепловоза виникла у зв'язку з розвитком промислових центрів Європи у середині ХХ століття. Попередні моделі, такі як ЧМЕ2, мали недостатню потужність і зчепну масу для ефективного маневрування з важкими вантажними поїздами. Саме тому конструктори ŠKD Praha розпочали розробку нової серії тепловозів з покращеними тяговими характеристиками.

У 1963 році завод виготовив три дослідні зразки, які отримали позначення ЧМЕЗ. Випробування показали високу надійність, простоту обслуговування та ефективність нової машини. Надалі конструкція зазнала ряду змін, зокрема було вдосконалено систему керування, що дозволило машиністу працювати одноосібно, а також змінено форму кабіни для покращення огляду.

Серійне виробництво ЧМЕЗ тривало з 1964 до 1987 року, після чого почали випускати модернізовані модифікації: ЧМЕЗТ, ЧМЕЗМ, ЧМЕЗЕ. Загалом було виготовлено понад 7400 тепловозів цієї серії, які постачалися у різні країни Східної та Центральної Європи.

Завдяки своїй універсальності ЧМЕЗ використовувався не лише для маневрових робіт, а й для коротких приміських рейсів, промислових перевезень і обслуговування допоміжних колій. Станом на 2020 рік ці тепловози все ще активно експлуатуються на території України, зокрема на малозавантажених ділянках або як резервні локомотиви.

Оскільки конструкція ЧМЕЗ відповідає європейському габариту колії, тепловоз добре пристосований до роботи на дільницях зі змішаною шириною рейок — 1520 мм і 1435 мм. Це робить його зручним для використання на прикордонних переходах України, Польщі, Словаччини, Угорщини та країн Балтії.

У процесі серійного виробництва до конструкції вносилися численні зміни. Зокрема, підвищено комфорт і ергономіку кабіни машиніста, змінено систему охолодження двигуна, вдосконалено систему пуску дизеля, підвищено надійність електричної передачі.

У 1977 році було створено експериментальну модель ЧМЕЗМ, у якій вперше застосували вдосконалену електричну частину, дизельну установку потужністю 1500 к.с., збільшений запас пального (до 6000 кг) і підвищену швидкість руху (до 100 км/год). Хоча серійного виробництва цієї версії не розпочали, отримані технічні рішення стали основою для подальших моделей.

У 1980-х роках розроблено модифікацію ЧМЕЗТ, оснащену електродинамічним (реостатним) гальмом, що значно покращило безпеку та керованість локомотива. Тягові параметри залишилися на рівні базової моделі: потужність дизеля — 1350 к.с., маса — 123 т, швидкість — до 100 км/год. Зовнішньо відмінності мінімальні: на даху з'явилося гальмівне обладнання, а акумуляторні батареї розмістили по боках паливного бака.

Інша версія — ЧМЕЗЕ — отримала електронну систему керування, яка забезпечувала стабільну роботу двигуна на низьких обертах. Хоча в ній відсутнє реостатне гальмо, конструкція відзначалася підвищеною економічністю та плавністю керування.

З переходом до нових екологічних стандартів і вимог енергоефективності в 1990–2000-х роках розпочалися роботи з модернізації тепловозів ЧМЕЗ.

Одним із найвідоміших напрямів стала заміна старого дизеля на сучасні дизель-генераторні установки типу Caterpillar 3512B, що зменшило витрати пального та шумність роботи. У новій версії, що отримала позначення ЧМЕЗП,

встановлено генератор змінного струму Siemens 1FC2 631, електричний запуск двигуна та вдосконалені системи діагностики.

Сучасний ЧМЕЗП має потужність 1455 кВт, масу 123 т, осьову формулу 3о–3о, електричну передачу змінно-постійного струму та призначений для важкої маневрової та вивізної роботи на коліях шириною 1520 мм.

Тепловози серії ЧМЕЗ залишаються одними з наймасовіших у Європі. Їхня конструкція проста, надійна, добре пристосована до ремонтів і модернізацій. Вони використовуються на промислових підприємствах, у морських портах, на станціях формування поїздів і як резервні локомотиви на електрифікованих лініях.

Завдяки тривалому ресурсу, можливості модернізації та доступності запасних частин, ЧМЕЗ і сьогодні продовжує служити ефективним засобом перевезення та маневрування на залізницях України та інших країн Центральної Європи.

Загальний вигляд тепловоза ЧМЕЗ та розміщення обладнання показано на рисунку 1.1.

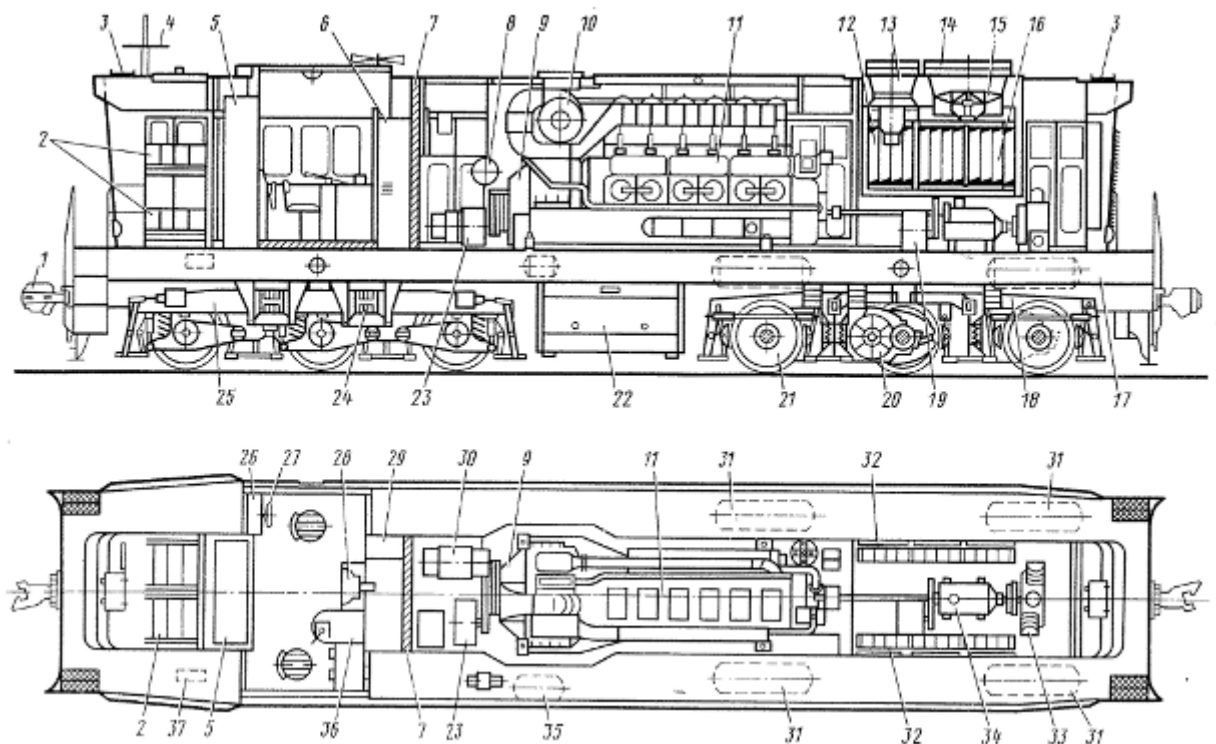


Рисунок 1.1 – Розташування обладнання тепловоза ЧМЕЗ:1 – автозчеплення;

2 – акумуляторна батарея; 3 – кришка пісочного бункера; 4 – антена; 5 – апаратна камера; 6 – інструментальний ящик; 7 – тепло- та звукоізоляційна стінка; 8 – резервуар керування; 9 – тяговий генератор; 10 – турбонагнітач; 11 – дизель; 12 – водяні секції радіатора допоміжного кола; 13 – вентилятор допоміжного контуру; 14 – верхні жалюзі шахти холодильника; 15 – головний вентилятор; 16 – водяні секції радіатора основного контуру; 17 – головна рама; 18 – передній візок; 19 – вентилятор охолодження тягових двигунів переднього візка; 20 – тяговий електродвигун; 21 – колісна пара; 22 – паливний бак; 23 – вентилятор охолодження тягових двигунів заднього візка; 24 – підвісний болт; 25 – задній візок; 26 – допоміжний пульт; 27 – ручне гальмо; 28 – калорифер; 29 – шафа для одягу; 30 – двомашинний агрегат; 31 – головний резервуар; 32 – бічні жалюзі шахти холодильника; 33 – компресор; 34 – гідромеханічний редуктор; 35 – запасний резервуар; 36 – пульт керування тепловозом; 37 – радіостанція

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики тепловоза ЧМЕЗ

Рід служби	маневровий
Зчіпна 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 коліс, мм	1050
Дизель	K6S310DR
Номінальна потужність дизеля, к.с.	1350
Тип передачі	електрична
Генератор	TD-802
Потужність генератора, кВт	885

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики тягового двигуна ТЕ-006

Маса, кг	2450
Номінальна напруга, В	283
Максимальна частота обертання якоря, об/хв.	2420
Номінальна потужність, кВт	134
При струмі, А	750
Та частоті обертання якоря, об/хв.	295

2 Математичне моделювання роботи тепловозу ЧМЕЗ

Для проведення модернізації тягового електроприводу необхідно зробити математичну модель існуючої системи, що застосована на тепловозі ЧМЕЗ, та дослідити її властивості. Математичне моделювання тепловоза проводимо поблоково.

2.1 Математичне моделювання двигуна постійного струму ТЕ-006

На тепловозі ЧМЕЗ встановлений тяговий двигун постійного струму послідовного збудження, а тому більш детально розглянемо цей тип двигуна.

Загальний вид електричної схеми та обмоток збудження двигуна постійного струму зображені на рисунку 2.1[4].

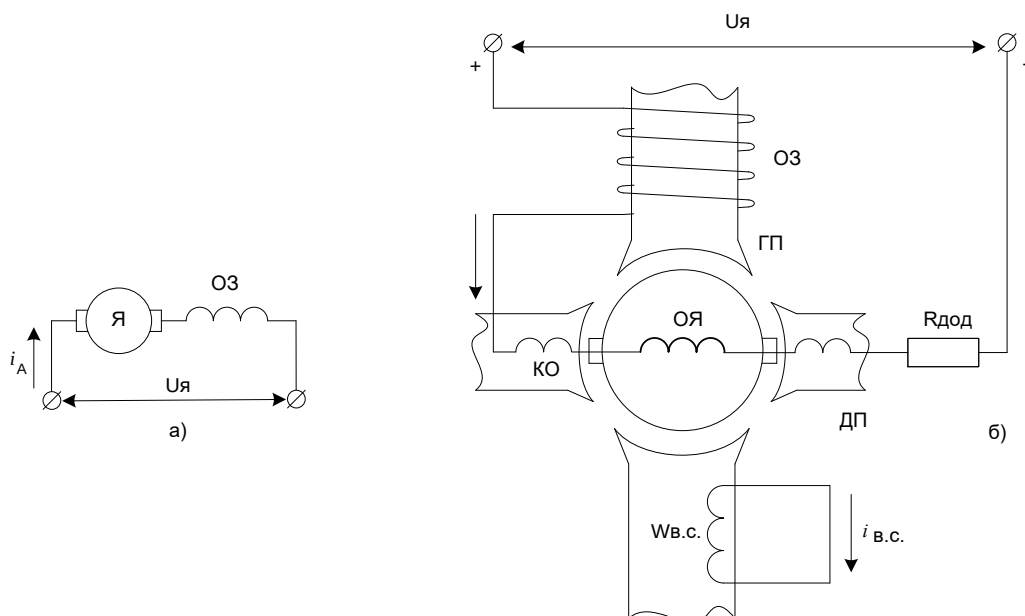


Рисунок 2.1 – Схема двигуна постійного струму з послідовним збудженням (а) та з'єднання обмоток узагальненої машини (б)

При прийнятій апроксимації кривої намагнічування (рисунок 2.2) механічна:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa\Phi(I_{\text{я}})} - \frac{MR_{\text{я}}\Sigma}{\kappa^2\Phi^2(I_{\text{я}})} \quad (2.1)$$

та електромеханічна:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa\Phi(I_{\text{я}})} - \frac{I_{\text{я}}R_{\text{я}}\Sigma}{\kappa\Phi(I_{\text{я}})} \quad (2.2)$$

характеристики при різних струмах якоря мають різні вирази. При $I_{\text{я}} < I_{\text{гр}}\kappa_{\text{ф}} = \text{const}$ ці рівняння перетворюються до виду:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\sqrt{\kappa}\kappa\Phi} - \frac{R_{\text{я}}\Sigma}{\kappa\kappa\Phi}, \quad (2.3)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa\kappa_{\text{ф}}I_{\text{я}}} - \frac{R_{\text{я}}\Sigma}{\kappa\kappa\Phi}. \quad (2.4)$$

При $I_{\text{я}} > I_{\text{гр}}\Phi = \Phi_{\text{нас}} = \text{const}$ і ті ж рівняння записуються так:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa\Phi_{\text{нас}}} - \frac{R_{\text{я}}\Sigma}{\kappa\Phi_{\text{нас}}} M, \quad (2.5)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa\Phi_{\text{нас}}} - \frac{R_{\text{я}}\Sigma}{\kappa\Phi_{\text{нас}}} I_{\text{я}}. \quad (2.6)$$

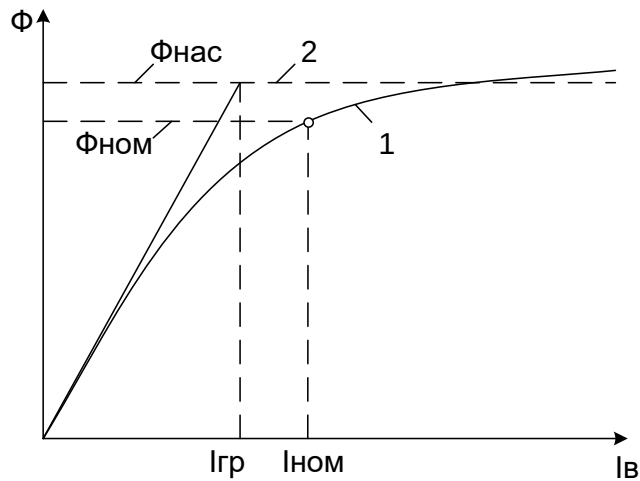


Рисунок 2.2 – Характеристика намагнічування $\Phi(I_{\text{в}})$

Рівняння (2.3) та (2.4) свідчать про те, що в області навантаження, що менше номінального, статичні характеристики двигуна послідовного збудження мають гіперболічний характер і при $M \rightarrow 0$ та $I \rightarrow 0$ асимптотично наближуються до вісі координат. Ця форма характеристики визначається умовами електричної рівноваги машини: при ідеальному холостому ході $I_{\text{я}} = 0$ ЕРС двигуна повинна урівноважувати прикладену до якірного кола напругу $U_{\text{я}}$. Так при $I_{\text{я}} \rightarrow 0$ потік Φ також прямує до нуля, виконання умови:

$$E = k\Phi\omega = U_{\text{я}} \quad (2.7)$$

можливе тільки при необмеженому зростанні швидкості. На справі швидкість ідеального холостого ходу двигуна з послідовним збудженням завдяки наявності залишкового потоку $\Phi_{\text{зал}}$ обмежена значенням $\omega_0 = U_{\text{я}}/\Phi_{\text{зал}}$. Однак $\Phi_{\text{зал}}$ настільки малий, та значення ω_0 набагато перевищує допустиме для двигуна за умовами механічної тривкості. Тому при проектуванні та експлуатації електроприводів з двигунами послідовного збудження необхідно виключити можливість їх роботи з малими навантаженнями, при яких

швидкість двигуна може перевищувати допустиму за умовами механічної тривкості[5].

Форма природної механічної характеристики двигуна з послідовним збудженням дозволяє при зниженні навантаження підвищувати мінімальну швидкість в 1,5-2 рази, забезпечувати підвищення продуктивності при заданій потужності двигуна. При цьому важливою перевагою двигуна є підвищена перевантажувальна спроможність.

В зв'язку з нелінійністю кривої намагнічування розрахувати природні характеристики двигуна з послідовним збудженням тільки за його номінальними даними неможливо, тому при проектуванні слід користуватися природними характеристиками $\omega = f(I_{\text{я}})$ і $M = f(I_{\text{я}})$, що наведені в каталогах (рисунок 2.3).

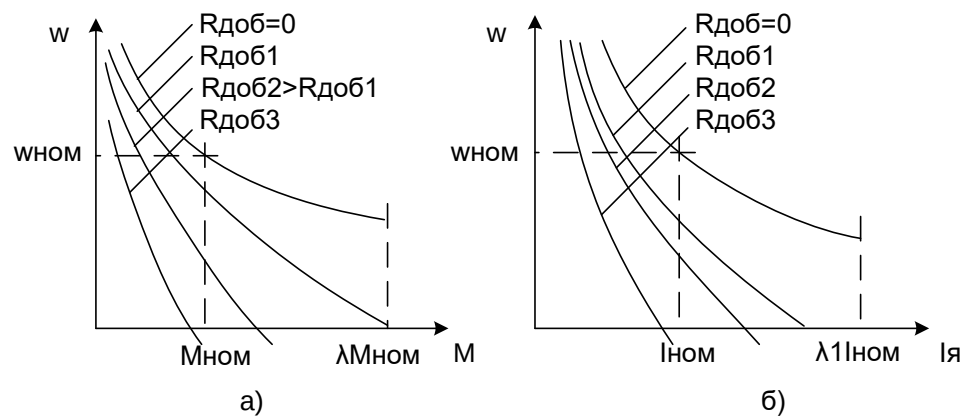


Рисунок 2.3 – Механічні (а) та електромеханічні (б) статичні характеристики двигуна з послідовним збудженням

Статична жорсткість механічної характеристики двигуна послідовного збудження залежить від навантаження. При малому навантаженні двигун має м'яку характеристику, з зростанням навантаження модуль жорсткості зростає і при $M \geq M_{\text{ном}}$ прямує до сталого значення, яке визначається:

$$\beta = \kappa^2 \Phi_{\text{нас}}^2 / R_{\Sigma} \quad (2.8)$$

Відповідно введення додаткового опору зменшує жорсткість механічних характеристик. Реостатні механічні та електромеханічні характеристики показані на рисунку 2, а, б разом з природними характеристиками, відповідаючи ми $R_{\text{дод}} = 0$, на якому бачимо, що введення додаткового опору в коло якоря дозволяє обмежити момент та струм короткого замикання двигуна.

Для побудови структурної схеми двигуна постійного струму послідовного збудження використовуємо систему рівнянь, які описують його поведінку:

$$\begin{cases} U_{\text{я}} = L_{\Sigma} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + r_{\Sigma} I_{\text{я}} + E \\ M_{\text{дв}} - M_{\text{с}} = J \frac{d\omega}{dt} \\ E = C_{\text{М}} \Phi \omega \\ M_{\text{дв}} = C_{\text{М}} \Phi I_{\text{я}} \end{cases}, \quad (2.9)$$

де $U_{\text{я}}$ — напруга живлення двигуна;

$I_{\text{я}}$ — струм двигуна;

r_{Σ} — загальний активний опір обмоток двигуна;

ω — кутова частота обертання якоря двигуна;

$M_{\text{дв}}$ — електромеханічний момент двигуна;

Φ — магнітний потік двигуна;

$C_{\text{М}}$ — електромеханічна стала двигуна;

E — електрорушійна сила.

Структурна схема електропривода постійного струму зображена на рисунку 2.4

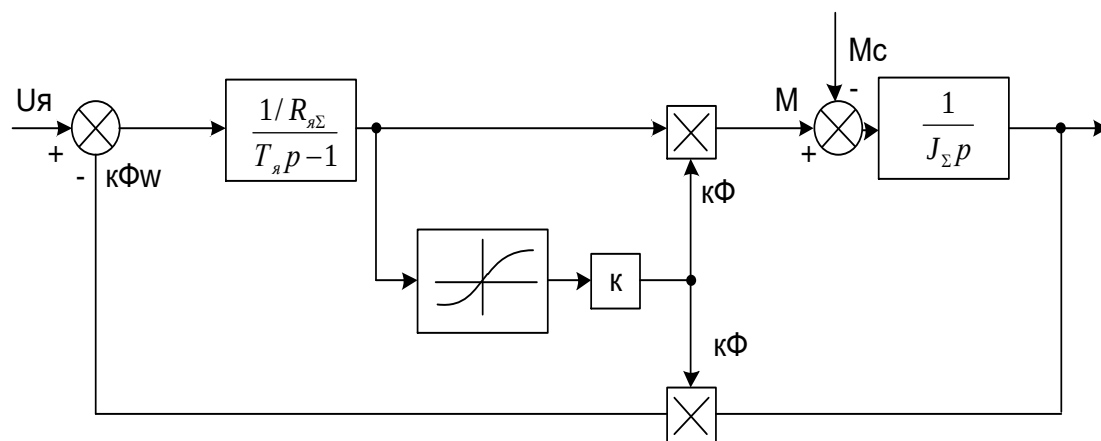


Рисунок 2.4 — Структурна схема електропривода постійного струму з двигуном послідовного збудження.

Таблиця 2.1 – Технічні параметри двигуна ТЕ-006

Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВт	123
Номінальна напруга, В	197
Номінальний струм якоря, А	750
Номінальна швидкість обертання, об/хв.	295
Число активних провідників	348
Число пар паралельних гілок а	2
Число пар полюсів р	2
Число витків обмотки збудження	18
Опір якоря, Ом	0,0076
Опір обмотки додаткових полюсів, Ом	0,0047
Опір обмотки збудження, Ом	0,0077
Діаметр якоря, м	0,986
Маса якоря, кг	1200

Розрахунок сумарного опору якорного ланцюга:

$$R_{\text{яЕ}} = R_{\text{я}} + R_{\text{Г.П}} + R_{\text{Д.П}}, \quad (2.10)$$

де $R_{\text{я}}$ - опір якоря;

$R_{\text{Г.П}}$ - опір котушок головних полюсів;

$R_{\text{Д.П}}$ - опір котушок допоміжних полюсів;

$R_{\text{К.О}}$ - опір котушок компенсаційної обмотки.

$$R_{\text{яЕ}} = 0,0076 + 0,0047 + 0,0077 = 0,02 \text{ Ом.}$$

Індуктивність якірного ланцюга

$$L_{\text{я}} = \frac{0,25 U_{\text{н}} 60}{2 p n I_{\text{н}} \pi}, \quad (2.11)$$

де $U_{\text{н}}$ – номінальна напруга двигуна;

$I_{\text{н}}$ – номінальний струм двигуна;

n – номінальна частота обертання об/хв.;

p – число пар полюсів.

$$L_{\text{я}} = \frac{0,25 \cdot 197 \cdot 60}{2 \cdot 2 \cdot 295 \cdot 750 \cdot 3,14} = 0,00106 \text{ Гн.}$$

Електромеханічна стала двигуна

$$C_{\text{м}} = \frac{p N}{2 \pi a}, \quad (2.12)$$

де N – число ефективних проводників;

a – число паралельних гілок.

$$C_{\text{м}} = \frac{2 \cdot 348}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} = 55,41.$$

Магнітний потік двигуна

$$\Phi_H = \frac{M}{C_M \cdot I_H}, \quad (2.13)$$

де M – номінальний момент двигуна;

I_H – номінальний струм двигуна.

$$\Phi_H = \frac{4330}{55,41 \cdot 750} = 0,1042 \text{ Вб.}$$

Для розрахунку індуктивності обмотки збудження L_{03} потрібно розрахувати потокозчеплення обмотки збудження Ψ

$$\psi = W \cdot \Phi_H \cdot \sigma, \quad (2.14)$$

де W – кількість витків обмотки збудження;

Φ – магнітний потік двигуна;

σ – коефіцієнт розсіювання полюсів.

$$\psi = 18 \cdot 0,1042 \cdot 1,2 = 2,25 \text{ Гн.}$$

$$L_{03} = \frac{\psi}{I_{03}}, \quad (2.15)$$

де I_{03} – струм збудження двигуна.

$$L_{03} = \frac{2,25}{750} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Сумарна індуктивність обмоток двигуна:

$$L_{\Sigma} = L_{\text{я}} + L_{03} + L_{\text{дп}},$$

де $L_{\text{я}}$ – індуктивність якоря;

L_{03} – індуктивність обмотки збудження;

$L_{дп}$ - індуктивність обмотки додаткових полюсів (приймаємо 20% від індуктивності обмотки збудження).

$$L_{\Sigma} = 1,06 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3} + 0,2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 4,66 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Електромагнітна стала часу:

$$T_e = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}. \quad (2.16)$$

$$T_e = \frac{4,66 \cdot 10^{-3}}{0,02} = 0,233 \text{ с.}$$

Момент інерції якоря

$$J = \frac{mR^2}{2}, \quad (2.17)$$

де m – маса якоря;
 R – радіус якоря.

$$J = \frac{0,493^2 \cdot 1200}{2} = 145 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Таблиця 2.2 – Крива намагнічування двигуна ТЕ-006

$I_{\text{я}}$	187,5	375	562,5	750	937,5	1125
Φ	0,052	0,079	0,094	0,1042	0,11	0,116

За даними таблиці побудуємо криву намагнічування двигуна (рисунок 2.5).

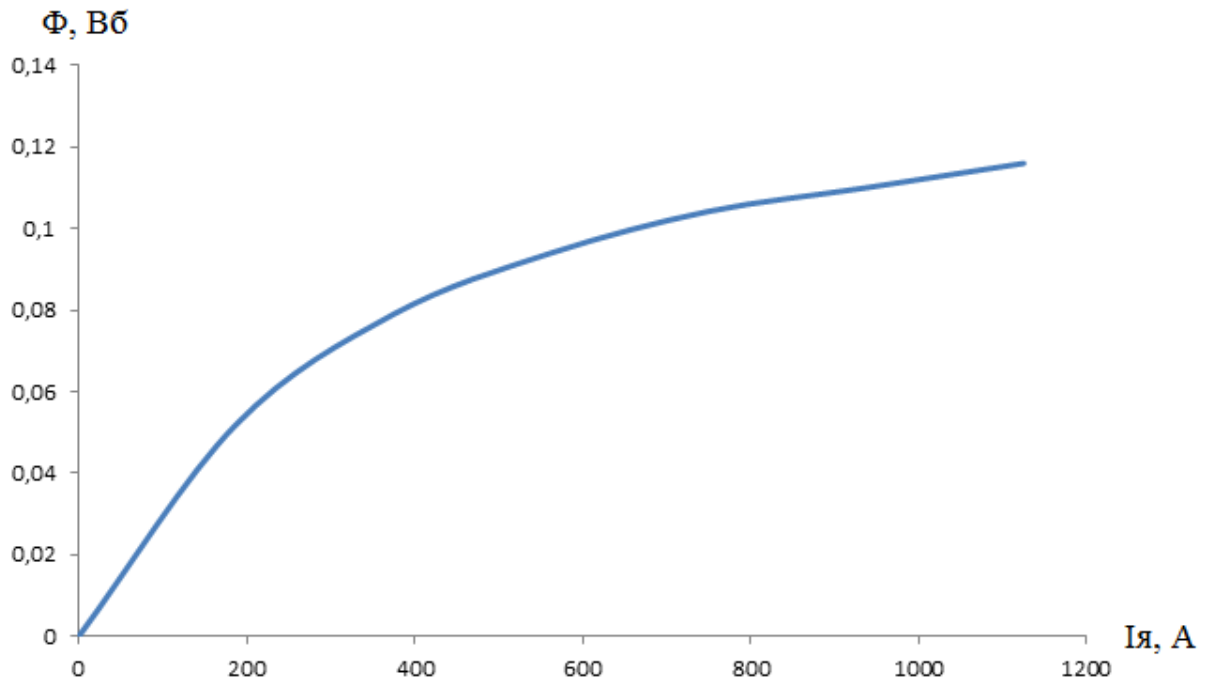


Рисунок 2.5 – Крива намагнічування двигуна TE-006

При протіканні струму у обмотці збудження створюється магнітний потік, частина якого розсіюється – це має назву потік розсіювання. Цей потік визначається за формулою:

$$\Phi_s = -W \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.18)$$

де W - число витків обмотки збудження;

Φ – основний магнітний потік.

На рисунку 2.6 представлена математична модель двигуна постійного струму послідовного збудження, зроблена за допомогою програмного забезпечення Matlab 12.

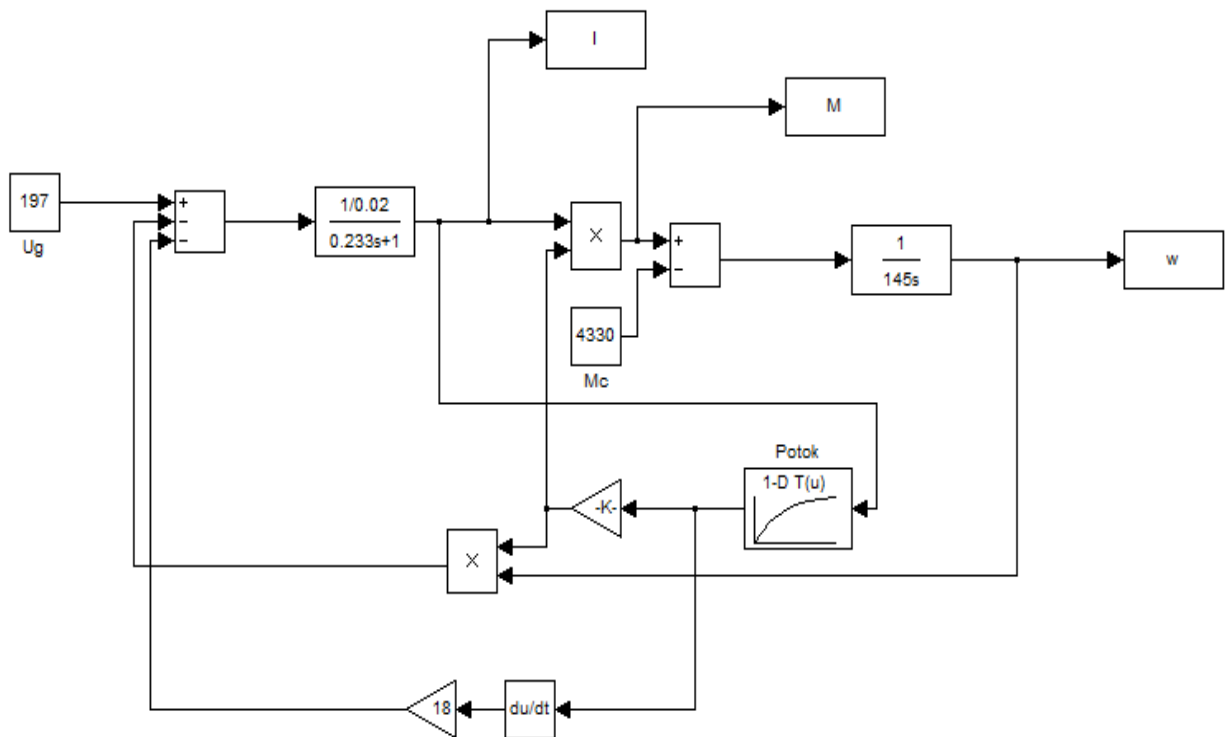


Рисунок 2.6 – Математична модель двигуна постійного струму послідовного збудження

На рисунках 2.7 та 2.8 зображені кутова швидкість та момент на валу відповідно при прямому пуску двигуна.

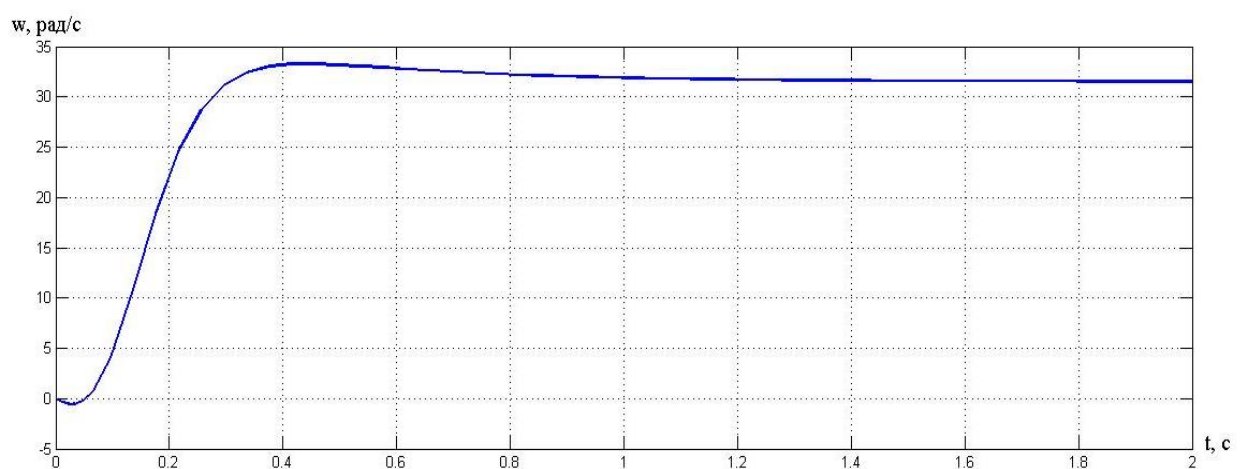


Рисунок 2.7 – Кутова швидкість двигуна при прямому пуску

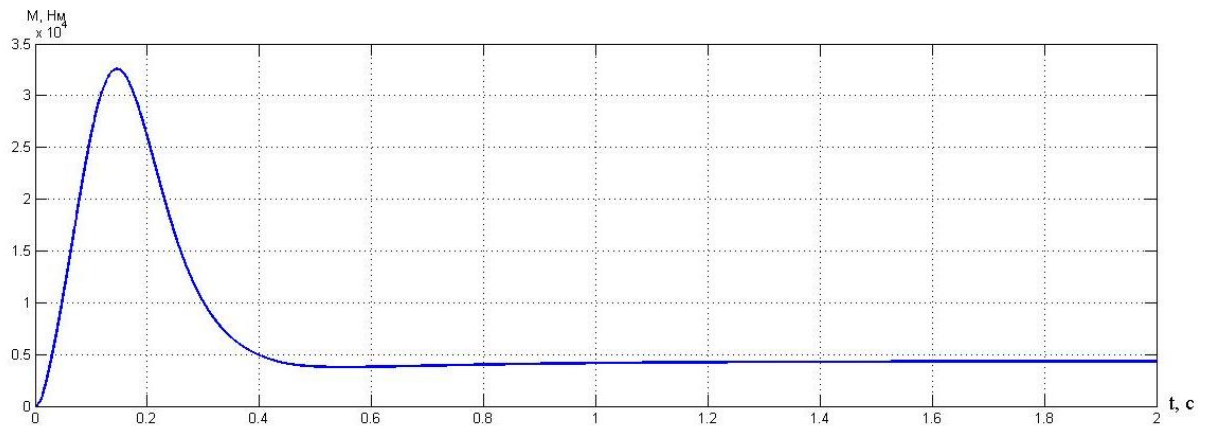


Рисунок 2.8 – Момент двигуна при прямому пуску

2.2 Математичне моделювання генератора постійного струму TD-802

На маневровому тепловозі ЧМЕЗ встановлений тяговий генератор постійного струму незалежного збудження. Його функціональна електромеханічна та електрична схеми представлені на рисунку 2.9.

Величина е.р.с., що виробляється генератором, прямо пропорційна магнітному потоку Φ , створюваному головними полюсами, і частоті обертання якоря n , згідно формули 2.19[6].

Напруга на виводах генератора менше його е.р.с. на величину падіння напруги в колі якоря. Падіння напруги в колі якоря визначається за законом Ома і дорівнює добутку струму якоря I_g на опір кола якоря R_{s_g} . Отже, напруга на виводах генератора

$$U_g = E_g - I_g \cdot R_{s_g}, \quad (2.19)$$

де E_g – едс генератора;

I_g – струм кола якоря;

R_{s_g} – опір кола якоря.

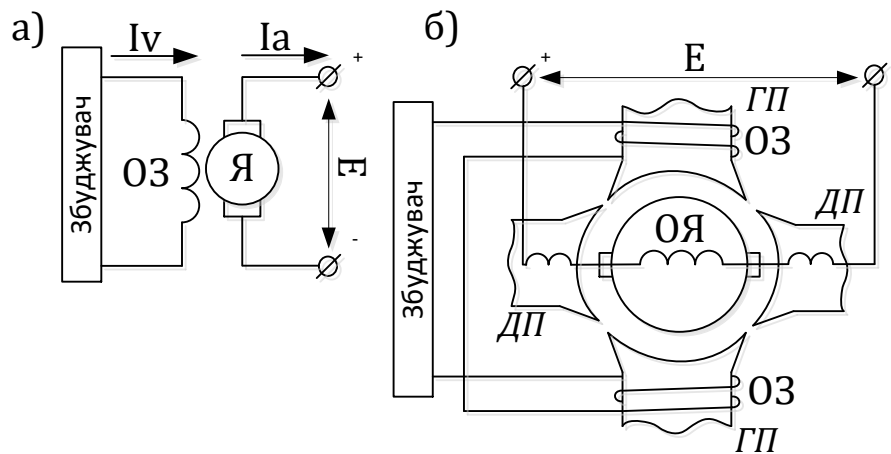


Рисунок 2.9 – Спрощена електрична схема генератора постійного струму з незалежним збудженням (а) та з'єднання обмоток узагальненої машини (б)

Загальний опір кола якоря складається з опорів обмотки якоря, послідовної обмотки збудження, обмотки додаткових полюсів, щіток і переходів між колектором і щітками.

Падіння напруги в ланцюзі якоря дуже невелике, тому що опір обмотки якоря мале. Тому напруга генератора буває лише незначно менше його е.р.с.

Потужність, що віддається генератором, завжди менше потужності, що витрачається на обертання якоря і збудження, тому що всередині генератора відбуваються втрати енергії. До цих втрат відносяться механічні втрати (тертя в підшипниках, тертя колектора та щітки), втрати на нагрів проводів обмотки якоря і обмотки збудження, магнітні втрати і т. д.

Відношення корисної потужності генератора, тобто тієї, яку він віддає в зовнішній ланцюг, до потужності, що витрачається для приводу генератора, називають коефіцієнтом корисної дії генератора. Якщо тяговий генератор тепловоза працює з повним навантаженням, його ККД досягає 94-95 %, тобто втрати в ньому досить малі.

Для збудження (створення робочого магнітного потоку в електричних машинах) генератора по обмотці його головних полюсів пропускають струм збудження. У генераторах з незалежним збудженням обмотка збудження

отримує живлення від стороннього джерела електричної енергії, в тепловозі від іншого генератора постійного струму – збуджувача[7].

Тяговий генератор тепловоза забезпечує використання номінальної потужності дизеля тепловоза. 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 I_g генератора при роботі дизеля на номінальній потужності буде значно змінюватися в залежності від швидкості руху локомотива. Легко здогадатися, що для підтримання сталості потужності тягового генератора в разі зміни струму необхідно обернено пропорційно змінювати напругу U_g генератора. Наприклад, якщо швидкість тепловоза зменшилася і струм в тягових двигунах і генераторі збільшився в два рази, то напруга генератора повинно знизитися також у два рази. Добуток струму генератора на його напругу залишиться постійною, отже, потужність, що виробляється тяговим генератором, також залишиться постійною.

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 2.10.

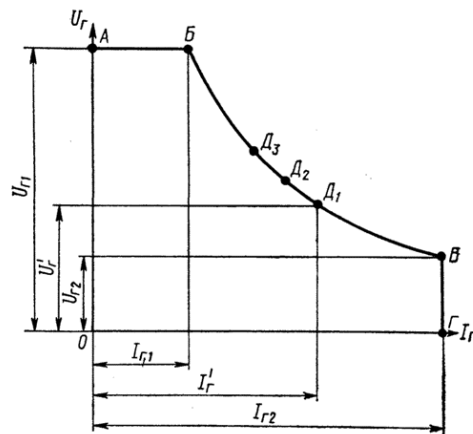


Рисунок 2.10 – Зовнішня характеристика тягового генератора

Необхідна зовнішня характеристика тягового генератора може бути представлена кривої 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 використовуємо систему рівнянь, яка описує його поведінку:

$$\begin{cases} U_{ag} = E_g - L_{sg} \cdot \frac{dI_{ag}}{dt} + R_{sg} \cdot I_{ag} \\ U_{vg} = L_{vg} \cdot \frac{dI_{vg}}{dt} + R_{vg} \cdot I_{vg} \\ E_g = k_g \cdot \Phi_g \cdot \omega_{dis} \\ M_n = k_g \cdot \Phi_g \cdot I_{ag} \end{cases}, \quad (2.20)$$

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.

На основі цієї системи складаємо структурну схему у вигляді блоків:

У системі регулювання напруги керуючим впливом є зміна величини напруги збудження генератора і зміна частоти обертання вала дизель-генератора. Зовнішній збуджуючий вплив - це падіння напруги в тяговому колі генератор-двигун. Регульованою величиною є напруга живлення тягового електродвигуна. Таким чином, тяговий генератора має три вхідних сигнали і

один вихідний сигнал. Структурна схема тягового генератора наведена на рисунку 2.11.

Для побудови математичної моделі генератора розрахуємо всі його невідомі параметри, що входять до структурної схеми.

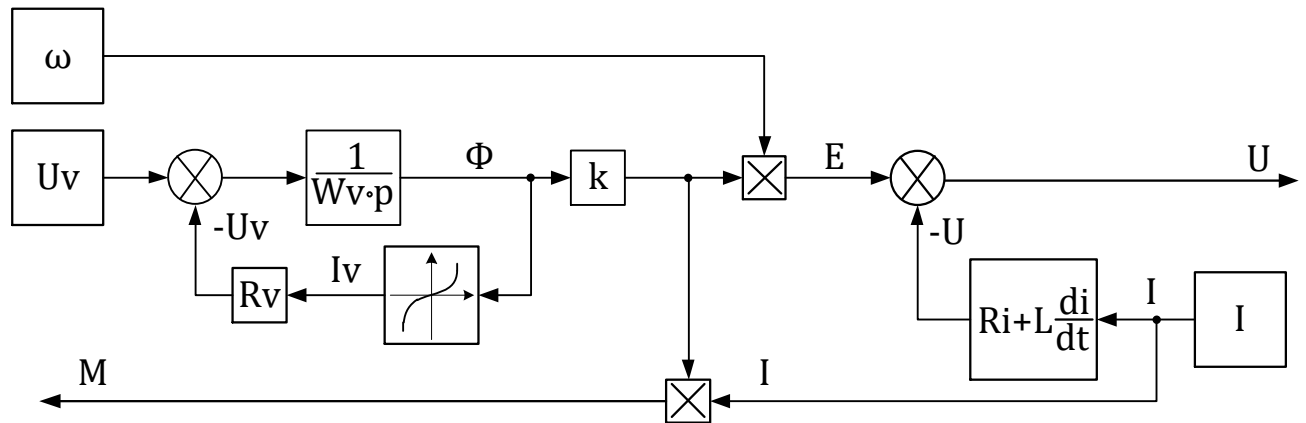


Рисунок 2.11 - Структурна схема генератора постійного струму з незалежним збудженням

Розрахунок сумарного опору якрного ланцюга генератора:

$$R_{sg} = (R_{ag} + R_{dpg}) \cdot k_{\text{міді}}, \quad (2.21)$$

де $R_{ag} = 0,0017$ – опір обмотки якоря генератора, Ом;

$R_{dpg} = 0,0017$ - опір котушок допоміжних полюсів генератора, Ом;

$k_{\text{міді}} = 1,24$ – коефіцієнт збільшення опору міді при нагріванні.

$$R_{sg} = (0,0017 + 0,0017) \cdot 1,24 = 0,0042.$$

Розрахунок електромеханічної сталої генератора проводимо за формулою

$$k_g = \frac{p_g \cdot N_g}{2 \cdot \pi \cdot a_g}, \quad (2.22)$$

де $N_g = 750$ – число ефективних провідників;

$p_g = 5$ – число пар головних полюсів генератора;

$a_g = 5$ - число паралельних гілок.

$$k = \frac{5 \cdot 750}{2 \cdot 3,14 \cdot 5} = 128,91.$$

$$\omega_{dis} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{dis}}{60}, \quad (2.23)$$

$$\omega_{dis} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 750}{60} = 78,54 \text{ рад/с},$$

Розрахунок індуктивності якірного ланцюга генератора:

$$L_{sg} = \frac{C \cdot U_{нг}}{I_{нг} \cdot n_g \cdot p_g} \cdot \frac{3}{2 + I_{ag}/I_{нг}}, \quad (2.24)$$

де $C = 6$ – для машин без компенсаційної обмотки;

$U_{нг} = 377$ - номінальна напруга двигуна, В;

$I_{нг} = 2350$ - номінальний струм двигуна, А;

I_a – поточне значення струму якоря двигуна, А;

$n = 750$ – номінальна частота обертання, об/хв.;

$p = 5$ - число пар полюсів двигуна.

Так як поточне значення струму якоря двигуна змінюється в часі, в формулі (2.24) окремо знайдемо постійні коефіцієнти

$$K_{La_g} = \frac{3 \cdot C \cdot U_{нг}}{I_{нг} \cdot n_g \cdot p_g}, \quad (2.25)$$

$$K_{La_g} = \frac{3 \cdot 6 \cdot 377}{2350 \cdot 750 \cdot 5} = 0,00077.$$

$$K_{La1_g} = \frac{1}{I_{ng}}, \quad (2.26)$$

$$K_{La1_g} = \frac{1}{2350} = 0,000425.$$

Тоді формула (2.24) буде мати вигляд

$$L_{sg} = K_{La_g} \cdot \frac{1}{2 + I_{ag} \cdot K_{La1_g}}, \quad (2.27)$$

Розрахунок ЕРС двигуна виконується за формулою

$$E_g = k_g \cdot \Phi_g \cdot \omega_{dis}, \quad (2.28)$$

$$E = 128,9 \cdot 0,04 \cdot 78,53 = 404,9 \text{ В.}$$

За допомогою стандартних блоків збираємо в середовищі Simulink математичну модель тягового генератора постійного струму з незалежним збудженням TD-802 маневрового тепловоза ЧМЕЗ, зроблена за допомогою програмного забезпечення Matlab 12.

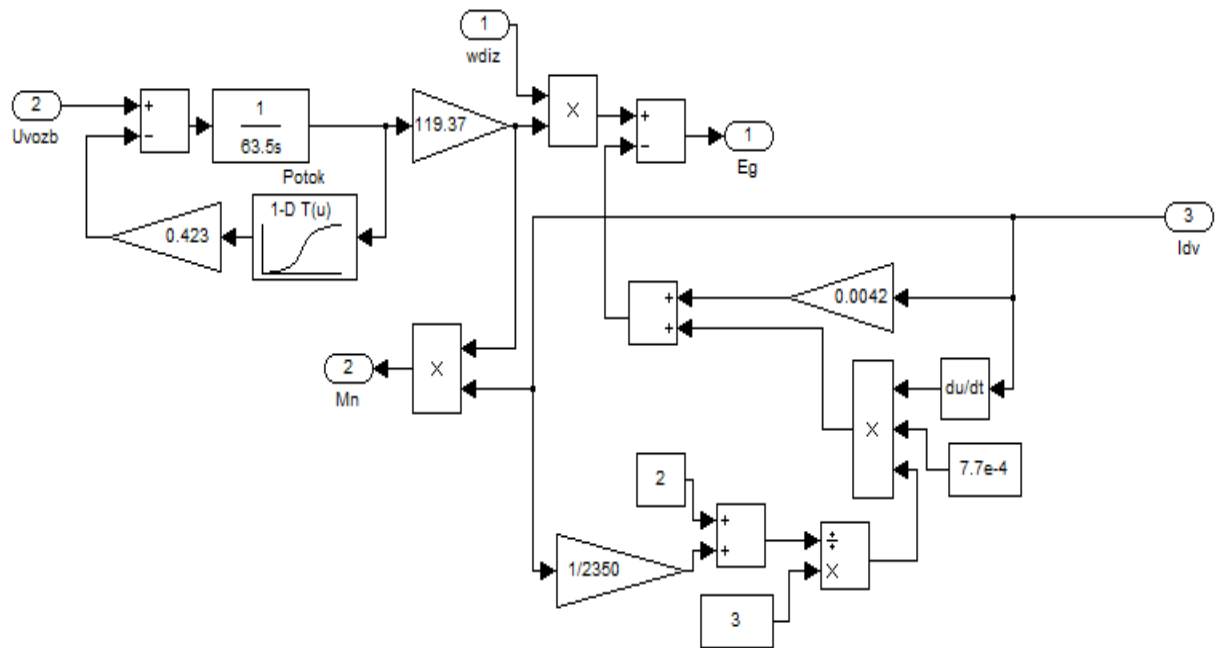


Рисунок 2.12 - Математична модель генератора постійного струму з незалежним збудженням

На рисунках 2.13, 2.14 показані відповідно характеристика моменту навантаження на валу дизеля та напруга живлення тягових двигунів при прямому пуску генератора з номінальними параметрами.

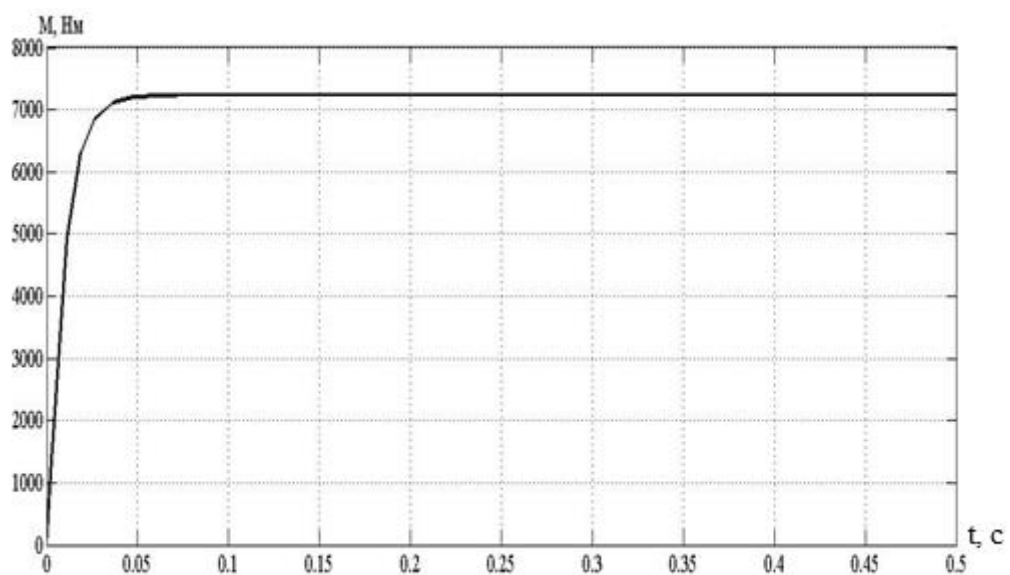


Рисунок 2.13 – Характеристика моменту навантаження на валу дизеля

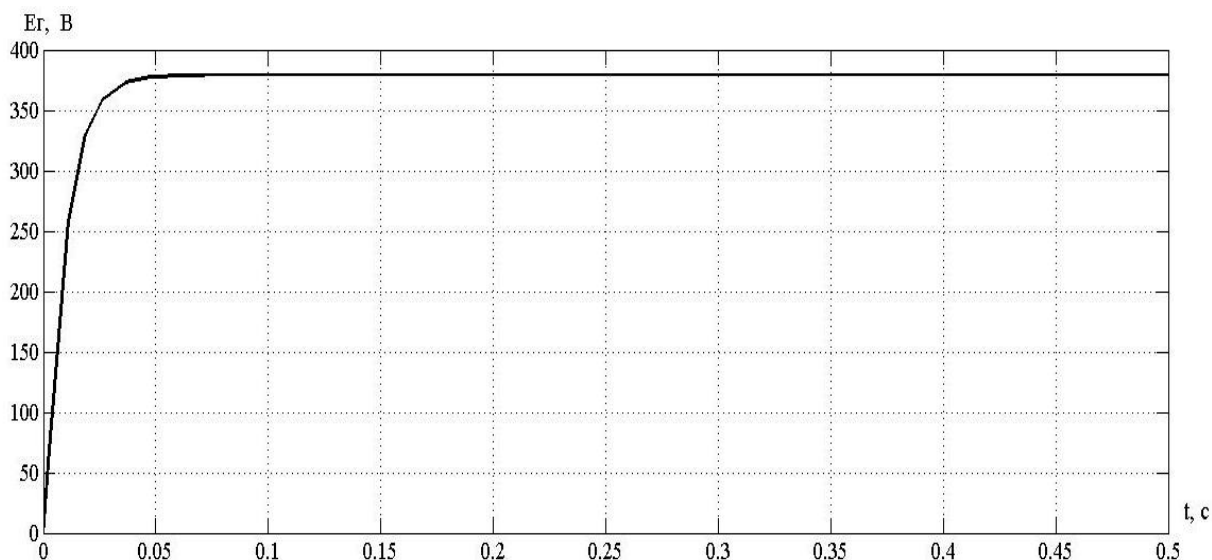


Рисунок 2.14 – Характеристика напруги живлення тягових двигунів

2.3 Математичне моделювання збуджувача тягового генератора

На обмотку збудження подається напруга від збуджувача – машини постійного струму.

Вихідна напруга збуджувача залежить від швидкості обертання вала дизеля, яка в свою чергу залежить від позиції контролера машиніста[9].

Номінальні параметри збуджувача, в залежності від позиції контролера машиніста зведені до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Номінальні параметри збуджувача, в залежності від позиції контролера машиніста

Позиція контролера машиніста	Напруга на затискачах збуджувача, В
1	2
1	45
2	48
3	53

Продовження таблиці 2.3

1	2
4	57
5	62
6	68
7	76
8	90

За допомогою стандартних блоків збираємо в середовищі Simulink блок завдання збудження тягового генератора – блок залежності напруги збудження від завдання швидкості обертання дизель-генераторної установки. Математична модель представлена на рисунку 2.15.

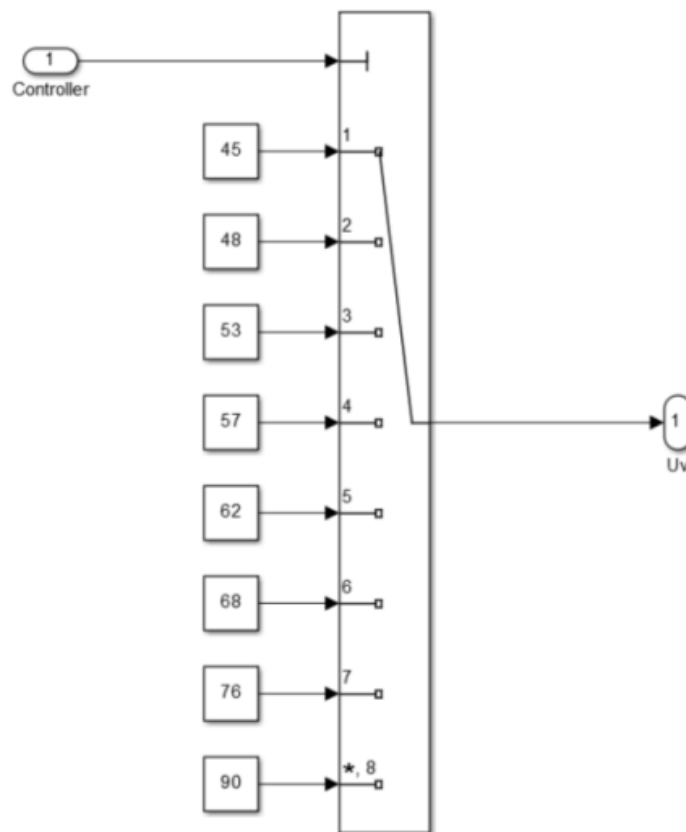


Рисунок 2.15 – Математична модель блока завдання напруги збудження тягового генератора

2.4 Математичне моделювання дизеля

На тепловозах ЧМЕЗ встановлений чотиритактний дизель K6S310DR з вертикальним розміщенням циліндрів та водяним охолодженням. Буква К означає, що дизель має наддув. Основні технічні характеристики дизеля наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – 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

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

2.4.1 Розрахунок та побудова індикаторної діаграми дизеля K6S310DR

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.

2.4.1.1 Розрахунок процесу газообміну

Цей процес 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:

$$P_a = P_o - (\beta^2 + \xi_{вп}) \cdot \frac{\omega_{шл}^2}{2} \rho_0 \cdot 10^{-6}, \quad (2.29)$$

де P_o – тиск навколишнього середовища, МПа;

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

$\omega_{вп}$ – середня швидкість руху заряду у прохідному перерізі впускної системи, м/с;

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

$$\rho_0 = \frac{P_o \cdot 10^6}{R_n \cdot T_0}, \quad (2.30)$$

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

T_0 – температура навколишнього середовища, К.

Коефіцієнт надлишкових газів:

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{P_r}{\varepsilon P_a - P_r}, \quad (2.31)$$

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:

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r \cdot T_r}{1 + \gamma_r}, \quad (2.32)$$

Коефіцієнт наповнення:

$$\eta_v = \frac{\varepsilon P_a}{P_0(\varepsilon - 1)} \cdot \frac{T_0}{T_0 + \Delta T}, \quad (2.33)$$

2.4.1.2 Розрахунок процесу стискання

Тиск у кінці стискання, МПа:

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1}, \quad (2.34)$$

де n_1 – показник політропи стискання.

Значення показника політропи стискання визначається з наступної формули:

$$n_1 = 1 + \frac{8,314}{20,16 + 1,788 \cdot 10^{-3}(\varepsilon^{k_1 - 1} + 1) \cdot T_a}, \quad (2.35)$$

де k_1 – показник адіабати, що визначається з номограми наведеної на рисунку 2.16.

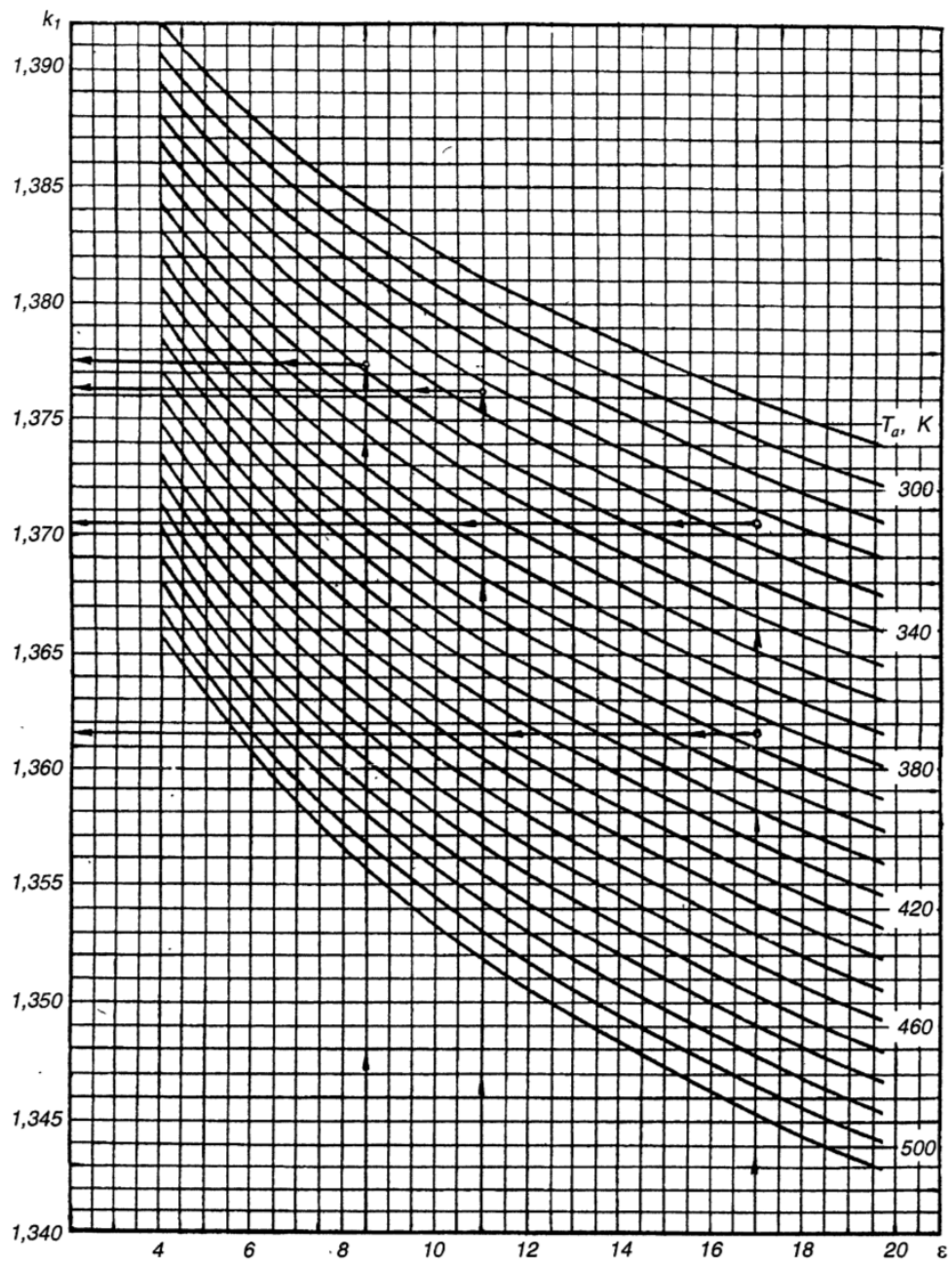


Рисунок 2.16 – Номограма для визначення показника адіабати стиснення k_1

Температура в кінці стискання, К:

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1 - 1}, \quad (2.36)$$

2.4.1.3 Розрахунок процесу згоряння

Для процесу згоряння слід визначити:

1 Теоретично необхідну кількість повітря для згоряння палива, кмоль/кг:

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right), \quad (2.37)$$

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

2 Кількість водяної пари в продуктах згоряння, кмоль/кг:

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2}, \quad (2.38)$$

3 Кількість молей азоту в продуктах згоряння, кмоль/кг:

$$M_{N_2} = 0,79 \cdot \alpha \cdot L_0, \quad (2.39)$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря.

4 Справжню кількість повітря і свіжого заряду, кмоль/кг:

$$M_1 = \alpha \cdot L_0, \quad (2.40)$$

5 Кількість кисню у продуктах згоряння, кмоль/кг:

$$M_{O_2} = 0,21 \cdot L_0 \cdot (\alpha - 1), \quad (2.41)$$

6 Кількість вуглекислого газу у продуктах згоряння кмоль/кг:

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12}, \quad (2.42)$$

7 Загальна кількість продуктів згоряння, кмоль/кг:

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{O_2} + M_{H_2O} + M_{N_2}, \quad (2.43)$$

8 Зміну кількості молей горючої суміші під час її згоряння:

$$\Delta M = M_2 - M_1, \quad (2.44)$$

9 Теоретичний коефіцієнт молекулярної зміни горючої суміші:

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1}, \quad (2.45)$$

10 Справжній коефіцієнт молекулярної зміни робочої суміші:

$$\mu = \frac{M_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r}, \quad (2.46)$$

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

$$mC_V = 20,038 + 2,554 \cdot 10^{-3} T_c, \quad (2.47)$$

12 Середню молярну теплоємність горючої суміші за сталого тиску, кДж/(кмоль·К):

$$mC_P = mC_V + 8,314, \quad (2.48)$$

13 Середню молярну теплоємність продуктів згоряння за сталого об'єму в кінці стиску, кДж/(кмоль · К):

$$mC_V'' = \frac{M_{CO_2}mC_{V_{CO_2}} + M_{CO}mC_{V_{CO}} + M_{H_2O}mC_{V_{H_2O}} + M_{N_2}mC_{V_{N_2}}}{M_2}, \quad (2.49)$$

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).

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

$$\Delta H_{\Pi} = 119 \cdot 10^3 \cdot (1 - \alpha)L_0, \quad (2.50)$$

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

$$\frac{\xi \cdot (H_{\Pi} - \Delta H_{\Pi})}{M_1 \cdot (1 + \gamma_r)} + mC_V T_C = \mu \cdot mC_V'' \cdot T_z, \quad (2.51)$$

де ξ – коефіцієнт використання теплоти;

H_n – 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'' .

16 Тиск газів у кінці згоряння, МПа:

$$P_z = \mu \cdot P_c \cdot \frac{T_z}{T_c}, \quad (2.52)$$

17 Ступінь підвищення тиску під час згоряння:

$$\lambda = \frac{P_z}{P_c}, \quad (2.53)$$

2.4.1.4 Розрахунок процесу розширення

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

Ступінь наступного розширення

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho}, \quad (2.54)$$

Тиск газів у кінці розширення, МПа:

$$P_n = \frac{P_z}{\delta^{n_2}}, \quad (2.55)$$

де n – показник політропи розширення.

Значення показника політропи розширення визначається з наступної формули:

$$n_1 = 1 + \frac{8,314}{23,7 + 0,0046 \cdot T_z \cdot (1 - \frac{1}{\delta^{k_2 - 1}}) \cdot T_a}, \quad (2.56)$$

де k_2 – показник адіабати розширення, який визначається з номограми наведеної на рисунку 2.17.

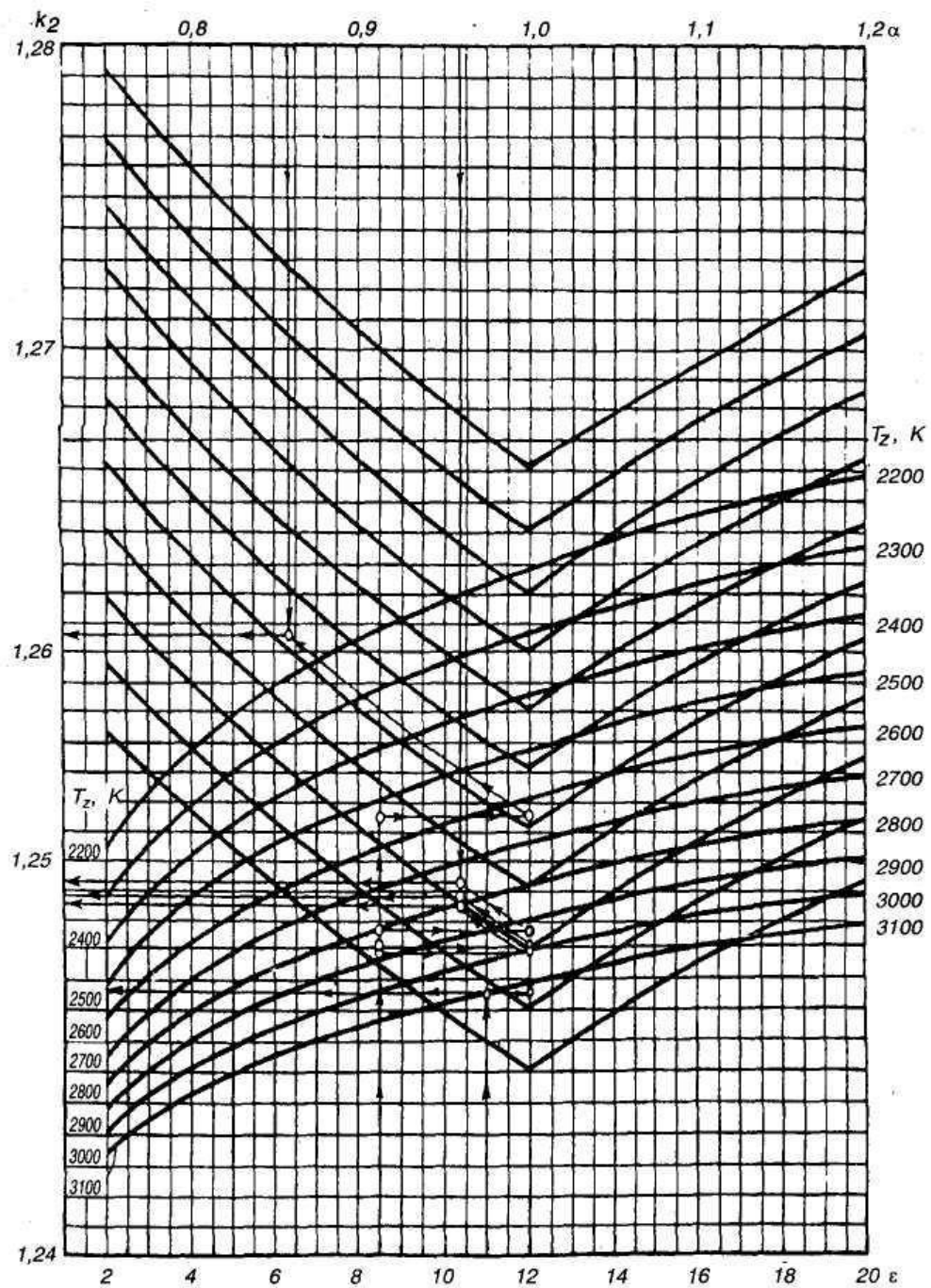


Рисунок 2.17 – Номограма для визначення показника адіабати розширення k_2

Температура газів у кінці розширення, К:

$$T_n = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}}, \quad (2.57)$$

2.4.1.5 Побудова індикаторної діаграми

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 діаграми чотиритактного дизеля K6S310DR, що наведена на рисунку 2.18.

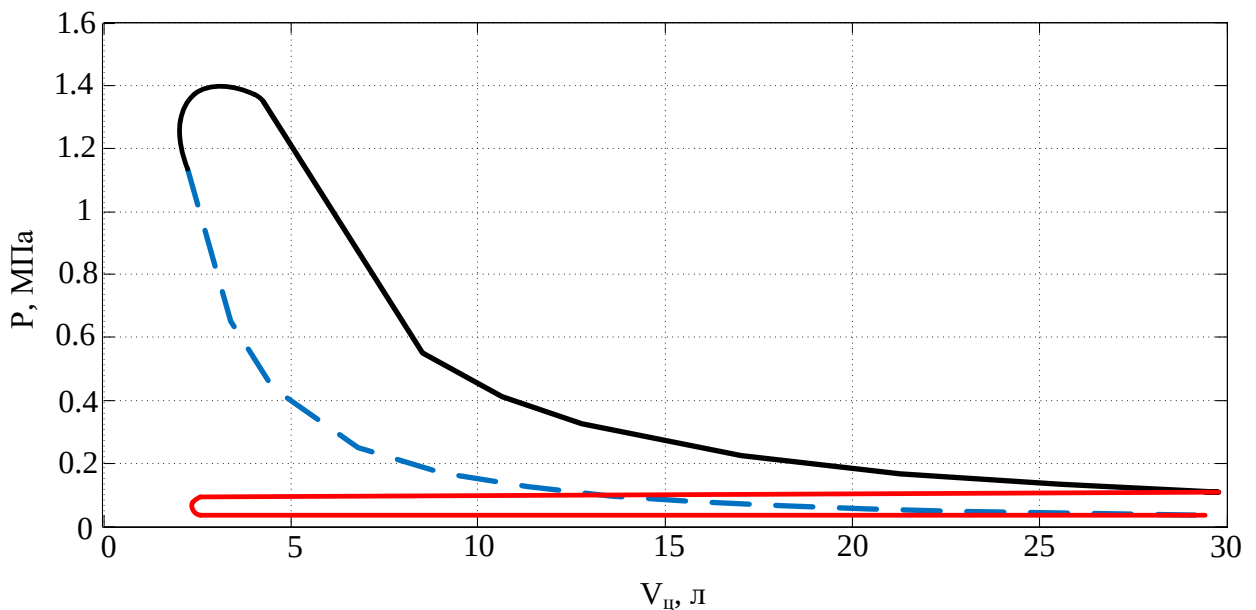


Рисунок 2.18 – Індикаторна діаграма роботи дизеля K6S310DR

Для подальшого створення моделі дизелю користування діаграмою у осях P та V 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 2.19.

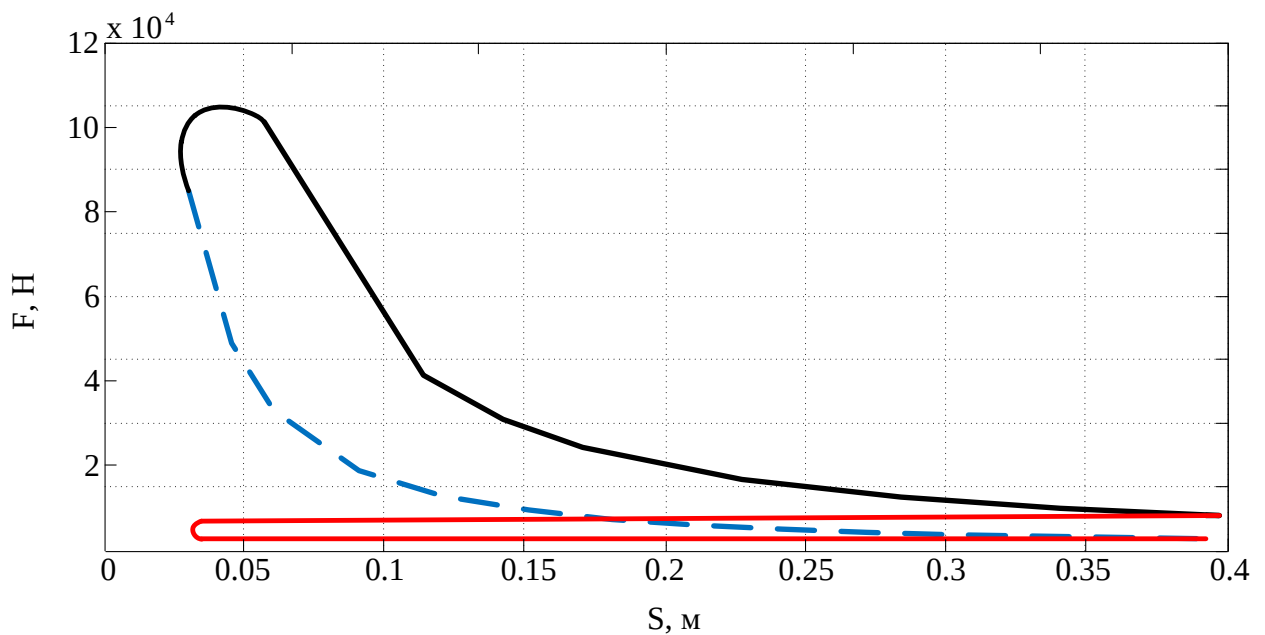


Рисунок 2.19 – Діаграма роботи дизеля K6S310DR

2.4.2 Апроксимація індикаторної діаграми

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 $\phi(x)$, яка проходить через ці точки, тобто

$$\phi(x_i) = y_i, i = \overline{1, n}. \quad (2.58)$$

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

Інтерполююча функція має вигляд:

$$\phi(x) = \phi(\vec{C}, x) = C_0\phi_0(x) + C_1\phi_1(x) + \dots + C_m\phi_m(x) = \sum_{k=0}^m C_k\phi_k(x), \quad (2.59)$$

де $\phi_0(x), \phi_1(x), \dots, \phi_m(x)$ – базисні функції.

Використовуючи умову (1) та вираз (2), отримуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} \phi(\vec{C}, x_0) = C_0\phi_0(x_0) + C_1\phi_1(x_0) + \dots + C_m\phi_m(x_0) = y_0 \\ \phi(\vec{C}, x_1) = C_0\phi_0(x_1) + C_1\phi_1(x_1) + \dots + C_m\phi_m(x_1) = y_1 \\ \dots \\ \phi(\vec{C}, x_n) = C_0\phi_0(x_n) + C_1\phi_1(x_n) + \dots + C_m\phi_m(x_n) = y_n \end{cases} \quad (2.60)$$

Єдине рішення системи (3) 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 невинродженою, тобто визначник системи $\Delta \neq 0$.

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

У випадку лінійної поліноміальної інтерполяції базисні функції мають наступний вигляд: $\phi_0(x) = x^0 = 1$, $\phi_1(x) = x^1 = x$, $\phi_2(x) = x^2$, ..., $\phi_m(x) = x^m$.

Інтерполююча функція при цьому має вигляд полінома ступеню m :

$$\phi(x) = P_m(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_mx^m \text{ і, як наслідок, система (3) має}$$

ВІГЛЯД

$$\begin{cases} C_0 + C_1x_0 + C_2x_0^2 + \dots + C_nx_0^n = y_0 \\ C_0 + C_1x_1 + C_2x_1^2 + \dots + C_nx_1^n = y_1 \\ \dots \\ C_0 + C_1x_n + C_2x_n^2 + \dots + C_nx_n^n = y_n \end{cases} \quad (2.61)$$

У матричній формі систему (4) можна переписати, як

$$A \times C = B, \quad (2.62)$$

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

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

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

Рішенням системи (4) буде вектор коефіцієнтів полінома C . Через те, що визначник матриці Ван дер Монда завжди відрізняється від нуля, то рішення системи єдине. Для рішення системи (4) необхідно знайти зворотну 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 $\phi(x) = P_n(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_nx^n$, коефіцієнти якого є рішеннями системи (4).

Вираз (1) визначає поведінку функції $\phi(x)$ тільки у вузлах інтерполяції $(x_i, y_i), i = \overline{0, n}$. Між вузлами $\phi(x)$ може вести себе довільним чином, скільки завгодно далеко відхиляючись від залежності $f(x)$. Визначити похибку наближення можна використовуючи вираз для абсолютної похибки $\varepsilon = |f(x) - \phi(x)|$.

Кращий спосіб перевірити якість інтерполяції – обчислити значення інтерполуючої 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

$$\varepsilon(x) \leq \frac{|(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_n)|}{(n+1)!} M_{n+1} \quad (2.63)$$

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 CurveFittingTool середовища Matlab, у якому і проводилась апроксимація результатів та розрахунок похибки.

На рисунках 2.20 та 2.21 наведені результати апроксимації сили стиснення та сили при робочому ході поршня.

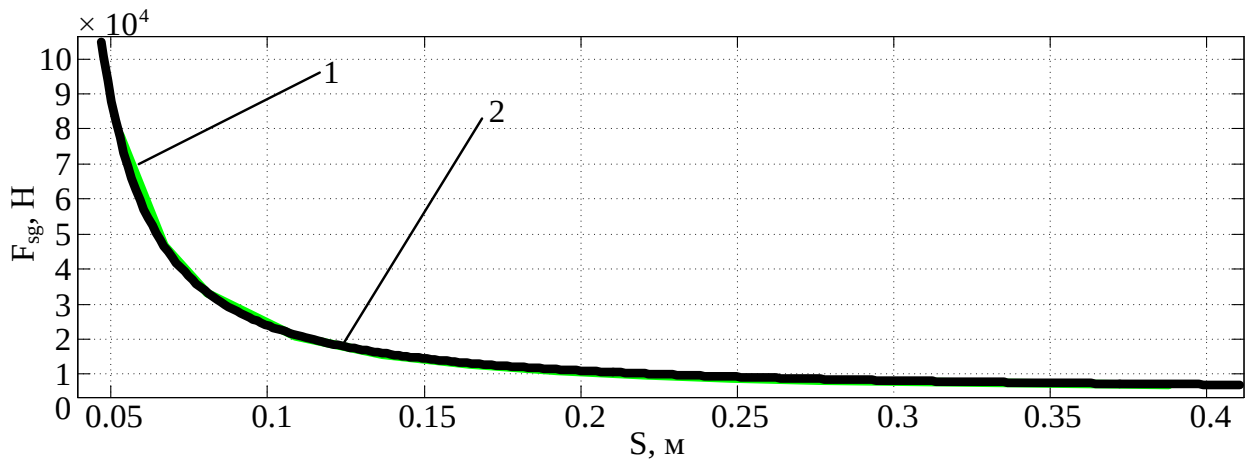


Рисунок 2.20 – Крива зміни сили стиснення: 1 – для розрахованих значень; 2 – для значень за поліномом.

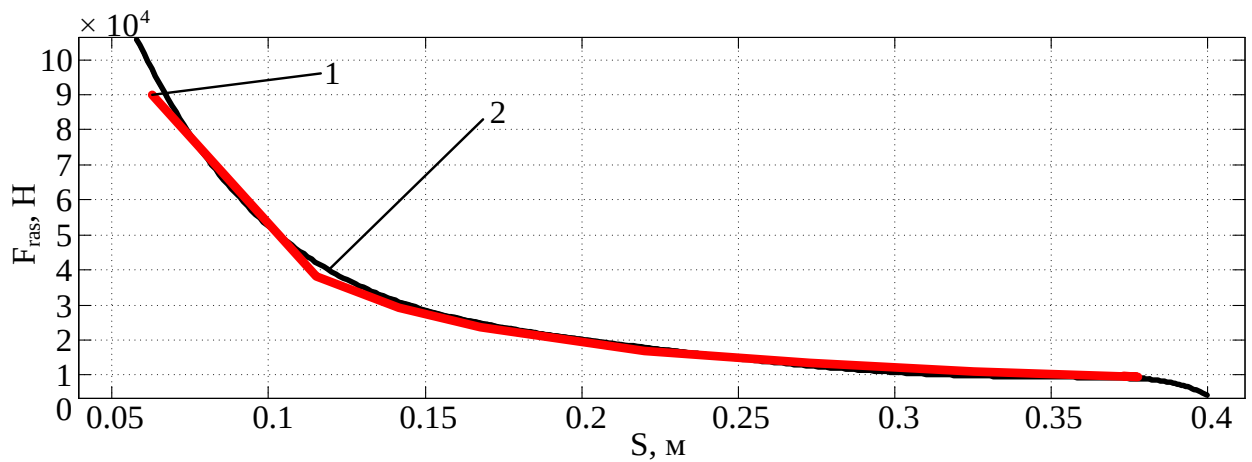


Рисунок 2.21 – Крива зміни сили при робочому ході поршня: 1 – для розрахованих значень; 2 – для значень за поліномом.

Для моделювання дизелю необхідно знати сумарну силу, що реалізується, в залежності від кута повороту колінчастого валу. Поперечні осі кривошипів, що утворені шатунними шийками та щокми, 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 2.22.

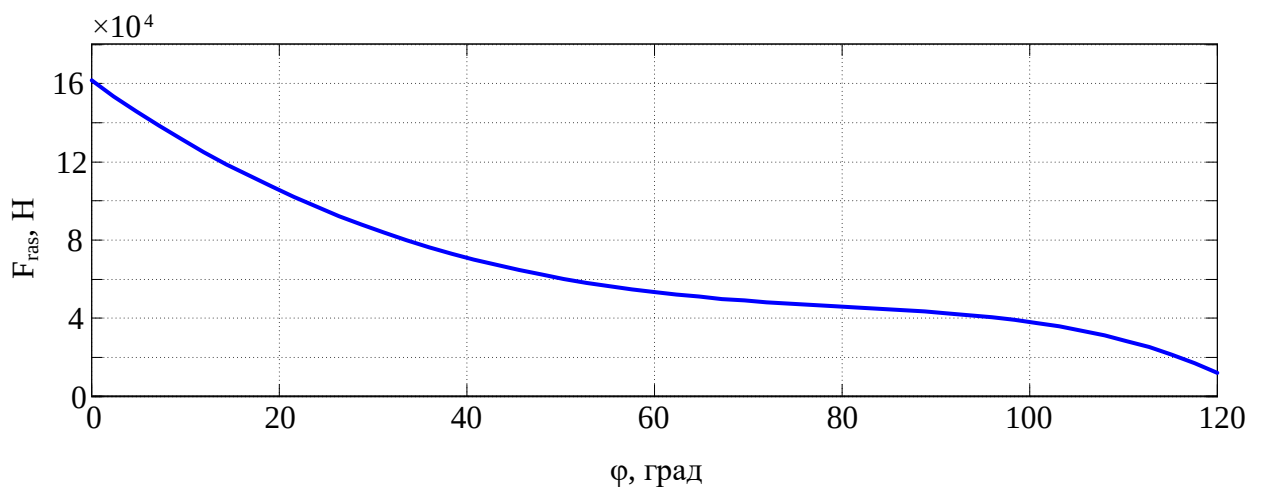


Рисунок 2.22 – Залежність сили, що реалізується дизелем від кута повороту колінчастого валу

2.4.3 Структурна схема імітаційної моделі роботи дизеля

На основі визначеної вище залежності сили дизелю від кута повороту колінчастого валу розроблена імітаційна модель роботи дизелю, що наведена на рисунку 2.23.

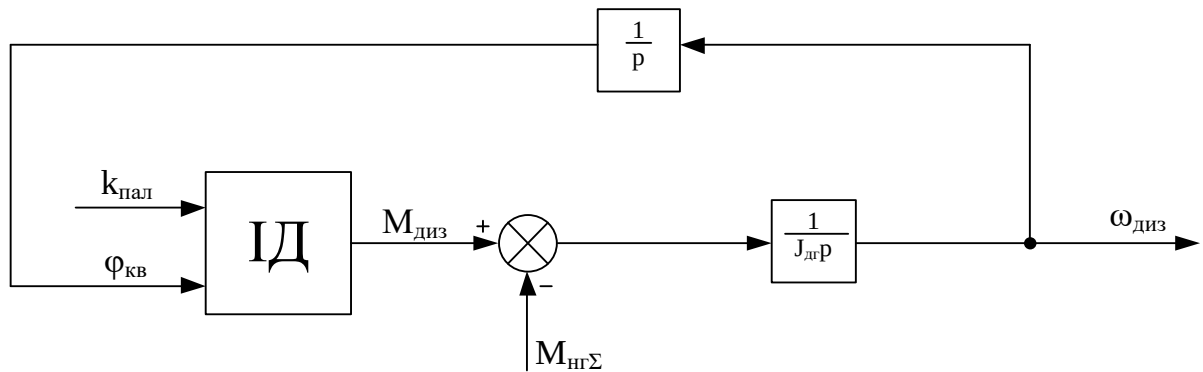


Рисунок 2.23– Структурна схема імітаційної моделі роботи дизеля K6S310DR

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

2.5 Математичне моделювання руху поїзда

2.5.1 Загальні відомості про рух потяга

Потяг є складною системою, що складається з багатьох частин, пружно і жорстко пов'язаних один з одним. Тому рух поїзда по рейковому шляху можна представити з корисного переміщення уздовж осі шляху, що супроводжується обертанням коліс, осей, якорів тягових двигунів, елементів рушійних механізмів і різних коливальних рухів, що накладаються на нього.

Ці коливання з'являються від збурюючих сил з боку шляху і навколишнього середовища, а також унаслідок взаємодії між окремими частинами поїзда. Розглянемо корисний рух і для цього представимо потяг як тверде тіло з масою m зосередженою в його центрі мас[13].

Рівняння руху поїзда можна вивести з виразу для його кінетичної енергії по теоремі Кеніга:

$$A_k = \frac{mv^2}{2} + \sum \frac{J_d w_d^2}{2} + \sum \frac{J_p w_p^2}{2} + \sum \frac{J_y w_y^2}{2}, \quad (2.64)$$

де A_k — кінетична енергія потяга;

m — маса потяга;

v — швидкість поїзда;

J_d, w_d — момент інерції і кутова швидкість рушійної колісної пари при застосуванні диференціальної передачі з пов'язаними з ними елементами рушійного механізму;

J_p, w_p — момент інерції і кутова швидкість підтримуючої колісної пари або коліс;

J_y, w_y — момент інерції і кутова швидкість якоря двигуна, включаючи частини передачі, укріплені на його валу.

У формулі (2.64) знаки суми вказують, що підсумовування енергії розповсюджується відповідно на всі колісні пари, колеса і якорі тягових двигунів, які можуть бути різних типів.

При радіусах рушійних і підтримуючих коліс відповідно R_d і R_p та передавальному числі рушійного механізму $\mu = \frac{\omega_y}{\omega_d}$ кутові швидкості руху частин, що обертаються, нехтуючи проковзуванням коліс, приймають:

$$\omega_d = \frac{v}{R_d} \quad (2.65)$$

$$\omega_{\Pi} = \frac{v}{R_{\Pi}} \quad (2.66)$$

$$\omega_{\text{я}} = \mu \omega_d = \frac{\mu v}{R_d} \quad (2.67)$$

Підставивши ці значення кутових швидкостей у вираз (2.41) після винесення за дужки $\frac{mv^2}{2}$ отримуємо:

$$A_k = \frac{mv^2}{2} \left[1 + \frac{\Sigma J_d / R_d^2 + \Sigma J_{\Pi} / R_{\Pi}^2 + \Sigma J_{\text{я}} \mu^2 / R_d^2}{T} \right] = \frac{mv^2}{2} \left(1 + \frac{T_{\text{э}}}{T} \right) \quad (2.68)$$

Величину, рівну чисельнику другого члена в квадратній дужці, називають еквівалентною масою частин, що обертаються, двочлен $1 + \frac{T_{\text{э}}}{T} = 1 + \gamma$ – коефіцієнтом інерції частин, що обертаються, а вираз $(1 + \gamma)T = T_{\Pi}$ – приведеною масою поїзда.

Таким чином, поїзд з масою m , що має поступальну ходу з одночасним обертанням деяких його частин, еквівалентний тілу з приведеною масою T_{Π} , що здійснює тільки поступальну ходу. Позначимо F_d – рівнодіючу сил, що діють на потяг. Зміна кінетичної енергії поїзда рівна роботі прикладених до нього сил, тому:

$$d \frac{(1+\gamma)mv^2}{2} = F_d ds \quad (2.69)$$

Звідки:

$$(1 + \gamma)mv \frac{dv}{ds} = F_d \quad (2.70)$$

Для знаходження співвідношення між швидкістю і часом слід підставити в рівняння (2.71) $v = \frac{ds}{dt}$, тоді:

$$(1 + \gamma)m \frac{dv}{dt} = F_d \quad (2.71)$$

Формули (2.47) і (2.48) також можна вивести на підставі другого закону Ньютона, застосувавши його до умов руху поїзда.

У рівняння (2.47) і (2.48) необхідно ввести, наприклад, в праві їх частини, переводні коефіцієнти ξ , оскільки довільно можуть бути вибрані одиниці вимірювань тільки для трьох з чотирьох вхідних в них величин:

$$(1 + \gamma)m \frac{dv}{dt} = \xi F_d \quad (2.72)$$

$$(1 + \gamma)mv \frac{dv}{ds} = \xi' F_d \quad (2.73)$$

Рівності (2.49) і (2.50) називають відповідно першою і другою формою рівняння руху поїзда.

Тягові розрахунки зручніше виконувати, користуючись питомими значеннями рівнодіючої сили і її складових, для чого рівняння (2.72) і (2.73) ділять на вагу G поїзда (іноді на масу поїзда m):

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\xi}{(1+\gamma)} f_d \quad (2.74)$$

$$v \frac{dv}{ds} = \frac{\xi'}{(1+\gamma)} f_d, \quad (2.75)$$

де $f_d = F_d/G$ – питома значення рівнодіючої сили.

2.5.2 Загальний аналіз основних режимів руху поїзда

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.

При дослідженні роботи потяга на імітаційній моделі задавались різні рівні обмеження по швидкості. На рисунках 2.24 – 2.26 показані осцилограми роботи маневрового тепловозу з 10 вагонами.

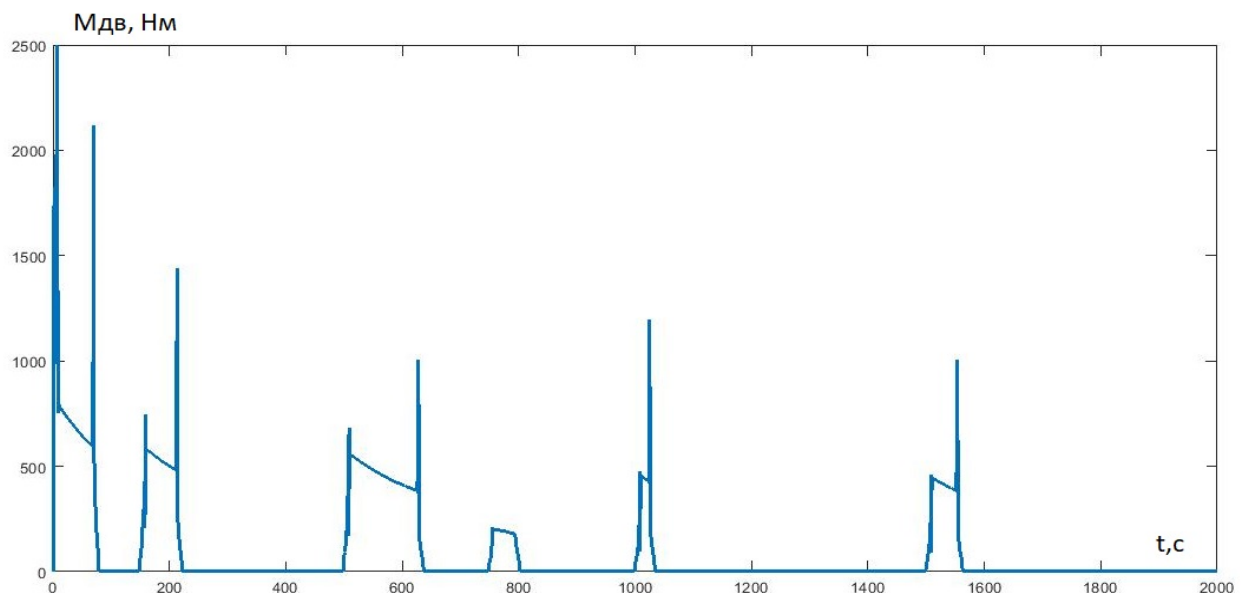


Рисунок 2.24 – Осцилограми моменту двигуна локомотива з поїздом

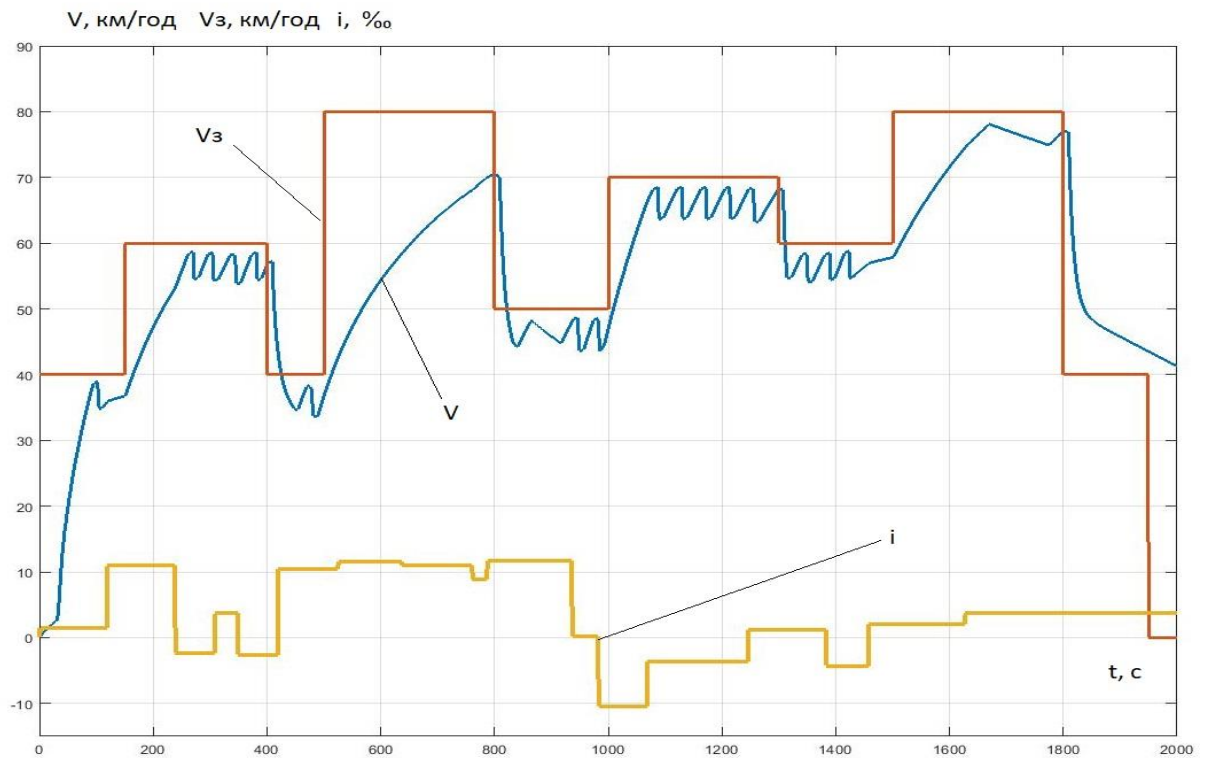


Рисунок 2.25 – Осцилограми швидкості локомотива з поїздом

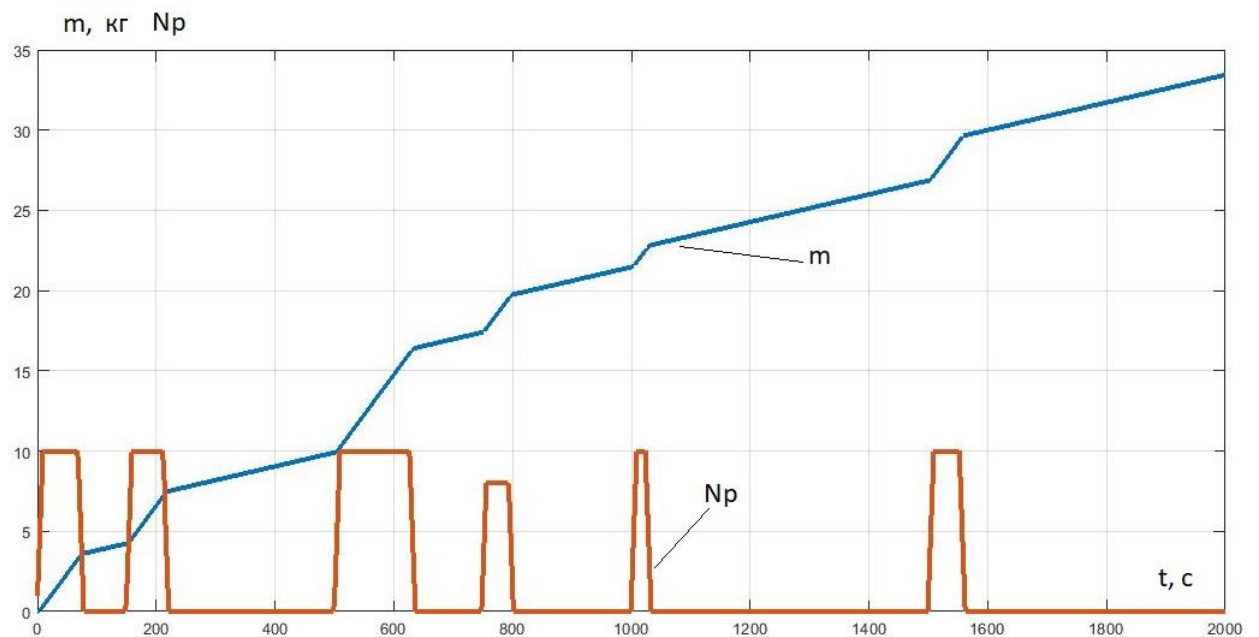


Рисунок 2.26 – Осцилограми розходу палива та робота позицій локомотива з поїздом

На отриманих осцилограмах на рисунку 2.20, кривою N_p показано процес набору позицій, який змінюється при різних величинах швидкості. Кожній позиції відповідає зміна напруги на тягових двигунах та величини

струму в них, яка обмежувалась на рівні 600 А. На графіку також просліджується тенденція зростання витрати палива при збільшенні швидкості.

Змінюючи максимальну швидкість в діапазоні 70-95 км/год з кроком 5 км/год були отримані результати, які представлені у вигляді тривимірної поверхні (рис.2.27).

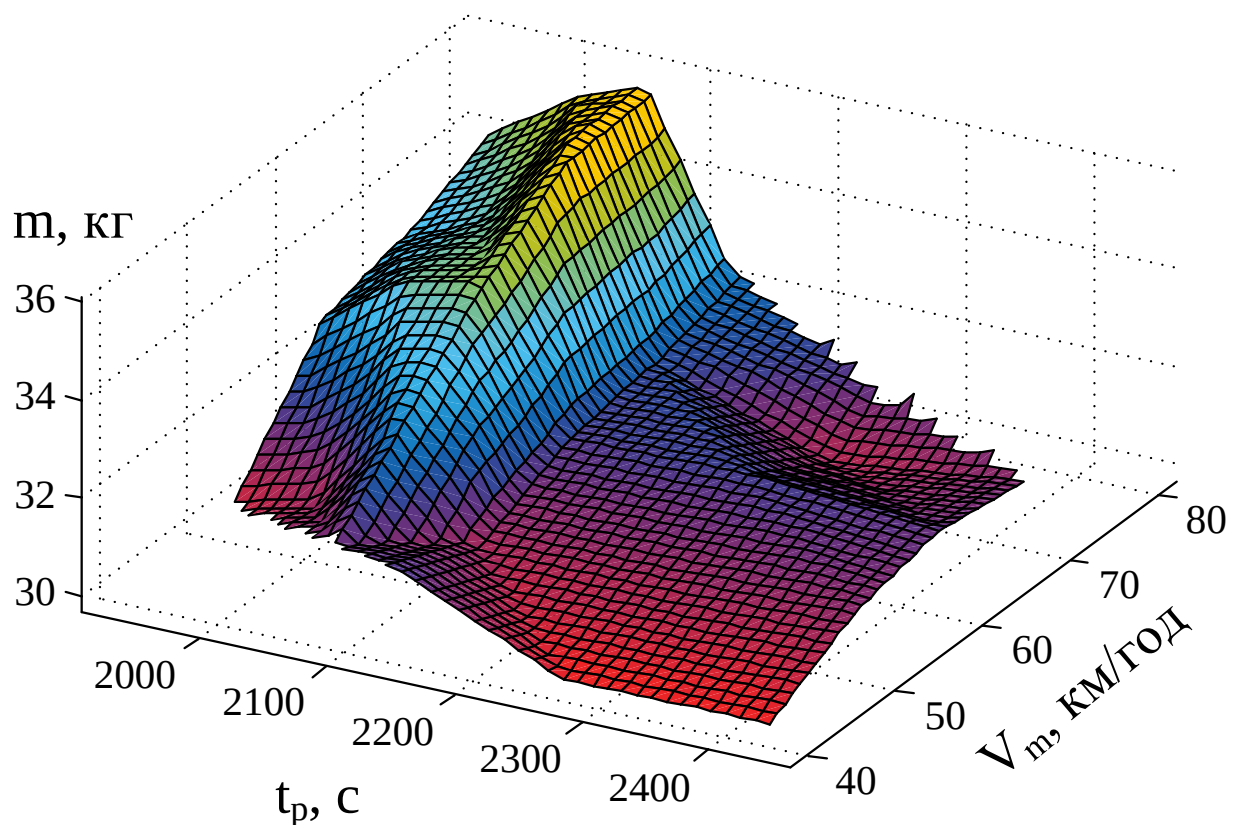


Рисунок 2.27 – Зміна витрат палива в залежності від максимальної швидкості

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. 2.27) на рівні 40-50 км/год.

3 Розробка та моделювання гібридної системи

Сучасна виробнича діяльність залізничних підприємств України, зокрема експлуатаційних і ремонтних підрозділів АТ «Укрзалізниця», а також промислових компаній, що мають власне колійне господарство, свідчить про гостру необхідність у впровадженні малопотужних, енергоощадних та екологічно безпечних локомотивів. Такі машини повинні виконувати широкий спектр допоміжних операцій — від станційного маневрування до переміщення вагонів на внутрішніх коліях промислових підприємств, у депо та ремонтних зонах.

На сьогодні в Україні та сусідніх країнах для виконання подібних завдань традиційно застосовуються тепловози серій ТЕМ2 і ЧМЕЗ, потужністю від 1200 до 1350 кінських сил, а також магістральні локомотиви типу 2ТЕ10М та 2М62. Однак їх експлуатація для малих навантажень є економічно недоцільною: значна витрата дизельного палива, висока потреба у мастильних матеріалах, збільшений обсяг технічного обслуговування та часті ремонти призводять до суттєвого зростання вартості експлуатації.

Аналіз фактичних режимів роботи маневрових тепловозів показує, що під час виконання основних операцій на станційних коліях середня потужність, яку вони реалізують, не перевищує 60–70 кВт, тоді як номінальна потужність у кілька разів більша. Середня швидкість руху при цьому становить лише 10–15 км/год, а маса составів, що переміщуються, зазвичай не перевищує 700–1000 тонн. Це свідчить про значну невідповідність між встановленою потужністю локомотива та реальними умовами його експлуатації.

Отже, виникає необхідність створення нового покоління маневрових локомотивів, які відповідатимуть сучасним технічним, економічним та екологічним вимогам. Основні критерії, яким мають відповідати ці локомотиви, включають:

Рациональне використання енергії, коли більша частина виробленої потужності спрямовується безпосередньо на створення тягового зусилля, а

допоміжні системи споживають мінімум ресурсів. Зменшення витрат на обслуговування та ремонт, що забезпечується підвищенням надійності силових установок, використанням модульних вузлів та сучасних систем діагностики. Високі екологічні показники, зокрема зниження рівня шкідливих викидів, шуму та вібрацій, відповідно до міжнародних стандартів ISO і Європейських норм (Stage IIIA, Stage IIIB, Stage V).

Одним із найефективніших напрямів у розробці сучасних маневрових локомотивів є застосування гібридної енергетичної установки. Така система поєднує дизель-генератор малопотужного типу та накопичувач енергії — зазвичай тягову акумуляторну батарею або блок суперконденсаторів. Принцип дії полягає в тому, що під час малих навантажень або короткочасних маневрів локомотив працює переважно від акумуляторів, тоді як дизель-генератор вмикається лише для підзарядки або при виконанні важчих операцій. Завдяки такому технічному рішенню вдається досягти значного скорочення споживання палива — до 40–50% у порівнянні з традиційними тепловозами, а також зменшити рівень викидів оксидів азоту, вуглецю та сажі. Крім того, гібридні установки дозволяють знизити рівень шуму на станційних коліях, що особливо важливо для міських або промислових зон. У світовій практиці подібні рішення уже активно впроваджуються. Зокрема, гібридні маневрові локомотиви серій Green Goat (Канада), Railpower RP20BD (США), а також Siemens Vectron Dual Mode (Німеччина) продемонстрували ефективність роботи при зменшених витратах енергії та високій екологічності. На їх основі розробляються вітчизняні концепції енергоощадних маневрових машин, адаптованих до умов української залізничної мережі.

Використання акумуляторно-дизельних систем у маневрових локомотивах також відкриває нові можливості для автоматизації та дистанційного управління. Завдяки електричному приводу, керування силою тяги та гальмуванням може здійснюватися з високою точністю, що підвищує ефективність маневрових операцій, скорочує час формування составів та покращує безпеку руху.

3.1 Вибір та обґрунтування функціональної схеми гібридного тепловоза

[illegible]

Рисунок 3.1 – Узагальнена функціональна схема гібридного маневрового тепловозу

Запропонована конструктивно-електрична схема гібридного локомотива передбачає наявність дизель-генераторної установки (ДГУ), яка забезпечує

вироблення електроенергії, випрямного блоку (В) для перетворення змінного струму на постійний, зарядного пристрою (ЗП), що слугує для підтримання енергетичного балансу акумуляторів, та статичного перетворювача (СП), який регулює параметри напруги і струму, необхідні для живлення тягових двигунів. Основним виконавчим елементом системи є тяговий електродвигун (ТЕД), що отримує живлення від двох типів накопичувачів енергії – акумуляторної батареї та батареї суперконденсаторів. Таке поєднання дозволяє оптимізувати роботу локомотива при різних режимах навантаження: акумулятори забезпечують стабільну тривалу подачу енергії, тоді як суперконденсатори ефективно компенсують короткочасні пікові навантаження під час розгону або гальмування.

Для дослідження ефективності роботи гібридного тепловоза передбачається використання двох типів тягових електродвигунів: традиційних двигунів постійного струму, які широко застосовуються на існуючому тяговому рухомому складі, та асинхронних тягових двигунів, що вважаються більш перспективними завдяки вищому коефіцієнту корисної дії, надійності та зниженим експлуатаційним витратам.

З метою детального аналізу роботи системи, усіх етапів енергоперетворення та взаємодії між її складовими була розроблена розширена функціональна схема гібридного тепловоза, яка наведена на рисунку 3.2. Вона відображає зв'язки між основними елементами енергетичного кола та дозволяє досліджувати різні режими роботи – пуск, рух з навантаженням, рекуперацію енергії під час гальмування та живлення від накопичувачів у разі вимкнення ДГУ.

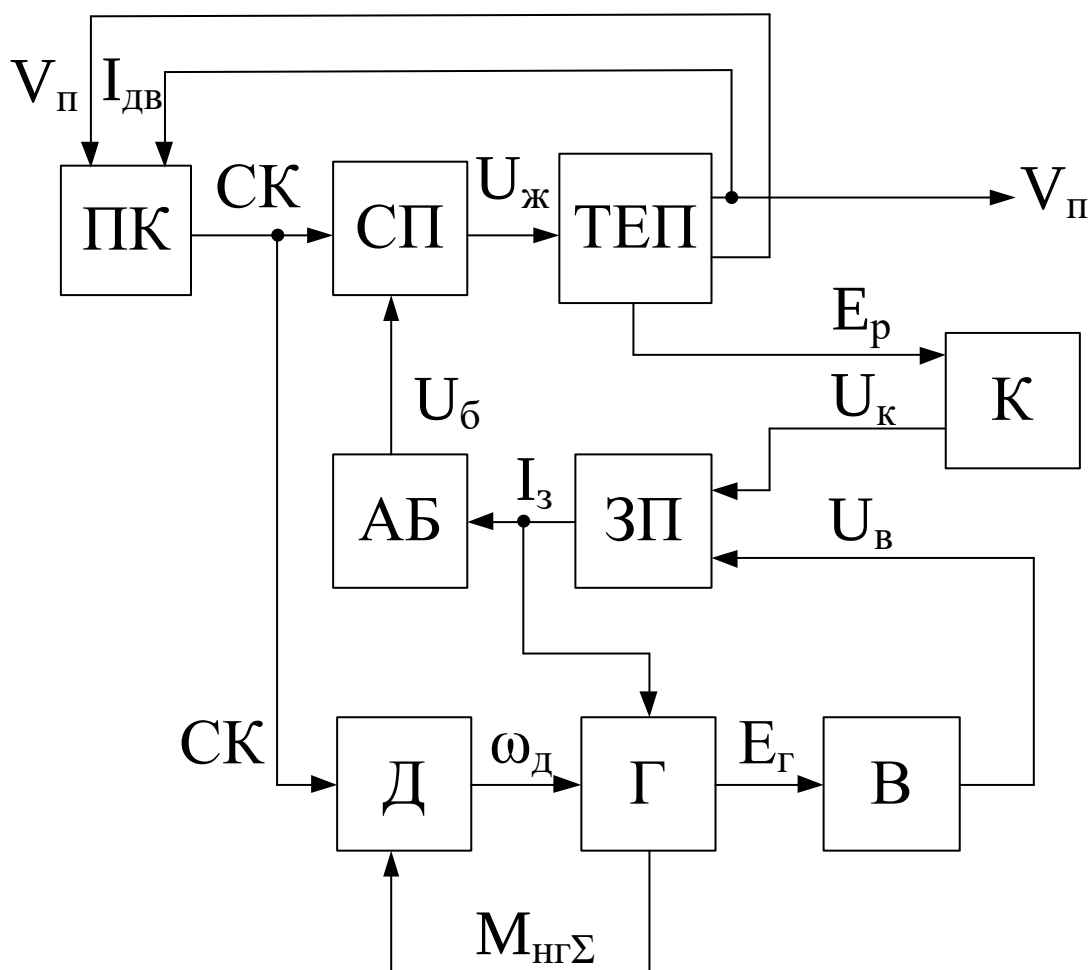


Рисунок 3.2 – Розгорнута функціональна схема гібридного тепловозу

Розроблена структурна схема гібридної енергосистеми тепловоза включає такі основні елементи: пульт керування (ПК), за допомогою якого машиніст задає режими роботи локомотива; статичний перетворювач (СП), що забезпечує узгодження параметрів електроенергії між джерелами живлення та тяговим електроприводом; тяговий електропривід (ТЕП), який перетворює електричну енергію в механічну тягу; конденсаторну батарею (К) для короткочасного накопичення та віддачі енергії під час пікових навантажень; зарядний пристрій (ЗП), який стабілізує напругу в енергосистемі; акумуляторну батарею (АБ), що забезпечує живлення при малих навантаженнях або в автономному режимі; випрямляч (В), який перетворює змінний струм у постійний; синхронний генератор (Г), зв'язаний із дизельним двигуном (Д), що є основним джерелом енергії системи.

Коли виконується умова (3.1), яка відповідає алгоритму роботи блоку вибору позиції (див. рис. 3.2), пульт керування (ПК) одночасно активує роботу статичного перетворювача (СП) та дизельної установки (Д). Це забезпечує скоординоване вмикання джерел живлення і передачу енергії до тягового електроприводу відповідно до заданого режиму руху.

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

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.

Статичний перетворювач (СП) отримує живлення від акумуляторної батареї (АБ), заряд якої здійснюється через зарядний пристрій (ЗП). Останній може підключатися як до конденсаторного блоку (К), так і до синхронного генератора (Г) через випрямляч (В). Конденсаторна батарея накопичує електроенергію під час рекуперативного гальмування і передає її у систему при досягненні певного порогу напруги, який відповідає номінальному значенню для стабільної роботи зарядного пристрою. Якщо рівень напруги на К знижується або акумуляторна батарея частково розряджена, живлення системи відновлюється за рахунок дизель-генераторного агрегату (Д–Г).

У якості тягового електроприводу (ТЕП) може використовуватися як двигун постійного, так і змінного струму — залежно від обраної конфігурації силової частини системи.

Панель керування (ПК) приймає основні вхідні параметри: швидкість руху локомотива V_p та струм двигуна I_{dv} . Від цих величин формується сигнал керування (СК), який є одночасно вхідною змінною для дизеля (Д) і статичного перетворювача (СП). У залежності від положення контролера

машиніста (тобто величини СК), СП задає рівень напруги живлення тягового електроприводу $U_{\text{ж}}$.

Живлення самого СП здійснюється від акумуляторної батареї, напруга якої позначається як $U_{\text{б}}$. Тяговий електропривод може працювати у двох основних режимах — тяговому та рекуперативному. У першому випадку вихідними параметрами ТЕП є швидкість руху поїзда V_n і струм двигуна $I_{\text{дв}}$, тоді як у режимі рекуперації генерується електрорушійна сила E_p , що повертає енергію у систему.

Зарядний пристрій (ЗП), отримуючи напруги U_k (від конденсатора) та $U_{\text{в}}$ (від випрямляча), формує струм заряду I_z , який спрямовується для підзарядки акумуляторної батареї або подається на генератор. Для генератора (Г) вхідними змінними є кутова швидкість обертання дизельного двигуна $\omega_{\text{диз}}$ та струм I_z , тоді як вихідними параметрами виступають електрорушійна сила генератора E_g та сумарний момент навантаження $M_{\text{нз}}\Sigma$, який передається на вал дизеля.

Таким чином, запропонована система утворює замкнутий енергетичний контур, у якому всі елементи взаємодіють з урахуванням режимів тяги, рекуперації та відновлення енергії. Це дозволяє ефективно керувати потоками потужності, зменшити втрати палива і забезпечити оптимальний режим роботи дизель-генераторної установки.

3.2 Математичне моделювання системи Г-Д.

Проведений аналіз режимів експлуатації тепловоза показав, що робота локомотива з повним навантаженням, тобто при номінальній потужності двигуна, займає в середньому лише близько 29% від загального часу його добової експлуатації. Решту часу тепловоз функціонує в перехідних або часткових режимах, що свідчить про значний енергетичний резерв, який може бути використаний для підвищення ефективності роботи силової установки.

У результаті проведених розрахунків було встановлено, що загальні добові витрати енергії під час роботи локомотива становлять близько 3,48 МВт·год. Ця величина охоплює сумарну енергію, спожиту тяговими двигунами, допоміжними системами, а також втрати, пов'язані з перетворенням і передачею енергії в електричних колах.

Виходячи з розрахункових даних, дизель-генераторна установка (ДГУ) повинна забезпечувати вироблення енергії, кількість якої перевищує зазначені добові витрати. Це необхідно для компенсації втрат, що виникають у процесі перетворення електричної енергії, та для підтримання запасу в акумуляторній батареї.

З метою підвищення економічності, надійності та екологічної безпеки роботи в запропонованій гібридній енергетичній системі (див. рис. 3.1) у якості базового прототипу обрано дизельний двигун Caterpillar C18 ACERT. Цей агрегат є сучасним високоефективним двигуном внутрішнього згоряння, який характеризується оптимальним співвідношенням потужності та паливної економічності, а також відповідає актуальним міжнародним стандартам викидів шкідливих речовин.

На рисунку 3.3 представлено зовнішній вигляд дизельного двигуна Caterpillar C18 ACERT, а його основні технічні параметри і характеристики наведені у таблиці 3.1. Зокрема, до таких характеристик належать: номінальна потужність, частота обертання, витрата палива, маса, габаритні розміри та ефективний ККД. Саме завдяки цим показникам даний двигун було обрано як найбільш придатний для модернізації тягової енергосистеми тепловоза типу ЧМЕЗ.

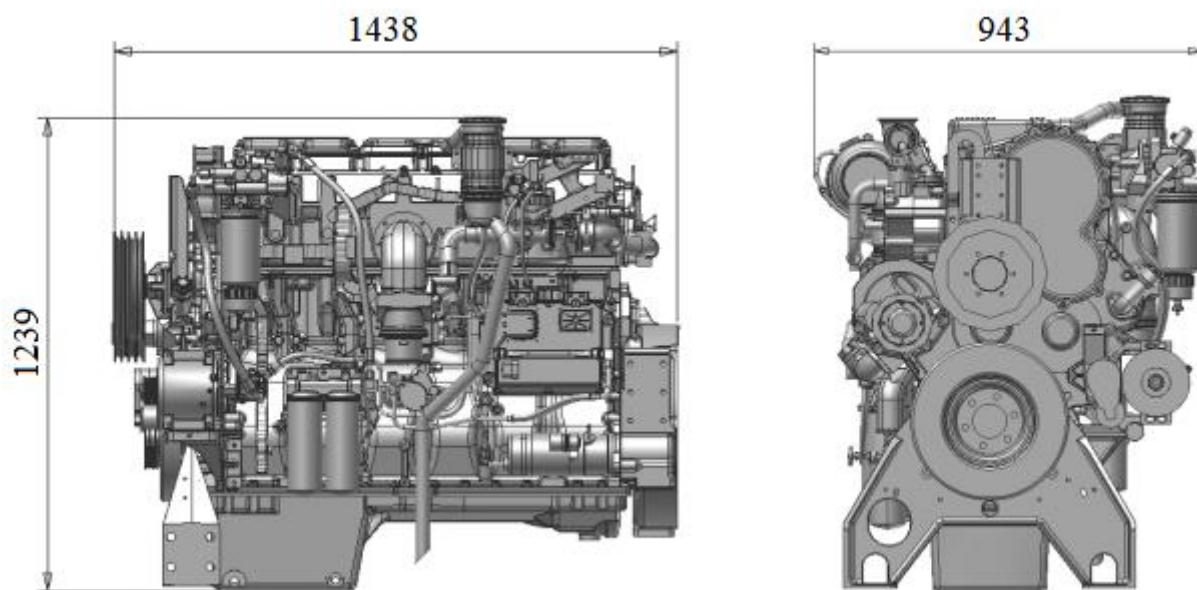


Рисунок 3.3 – Дизель C18 ACERT

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

Дизельні двигуни серії Caterpillar C18 ACERT належать до високоефективних силових агрегатів промислового та транспортного призначення. Їхня номінальна потужність знаходиться в діапазоні від 429 до 522 кВт (що еквівалентно 575–700 кінським силам) при частоті обертання колінчастого вала 1800–2100 об/хв. Такі характеристики забезпечують надійну роботу двигуна в широкому діапазоні навантажень — від економічних маневрових режимів до повної тягової потужності.

На рисунку 3.4 представлено робочу характеристику дизельного двигуна C18 ACERT, де наведено залежність основних експлуатаційних

параметрів — крутного моменту, потужності та питомої витрати палива — від частоти обертання двигуна. Дана діаграма дозволяє оцінити ефективність роботи двигуна в різних режимах та визначити оптимальні умови для його використання в складі гібридної енергосистеми тепловоза.

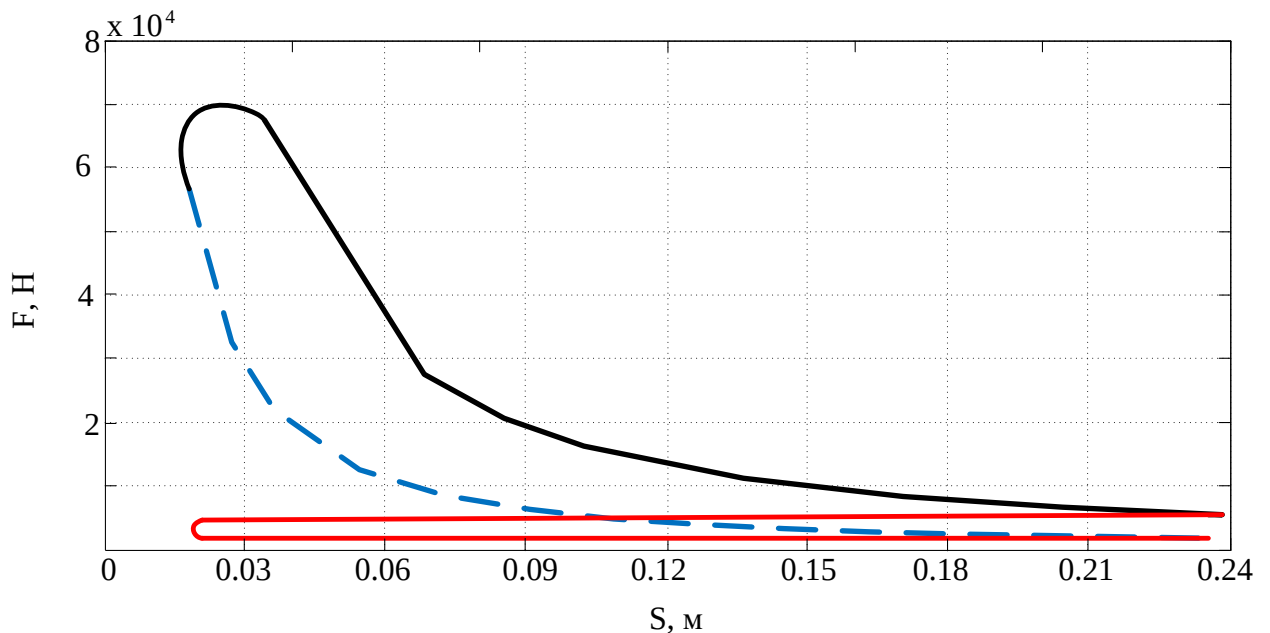


Рисунок 3.4 – Діаграма роботи дизеля C18 ACERT

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
Номінальний струм, А	900
Кількість фаз	3
З'єднання фаз	зірка
Частота обертання, об/хв.	2000
Маса, кг	1600

Математичне моделювання генератора виконано за допомогою блоку Synchronous MachinepuStandart з розділу SimPowerSystems програми 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. 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 198В. 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.

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.

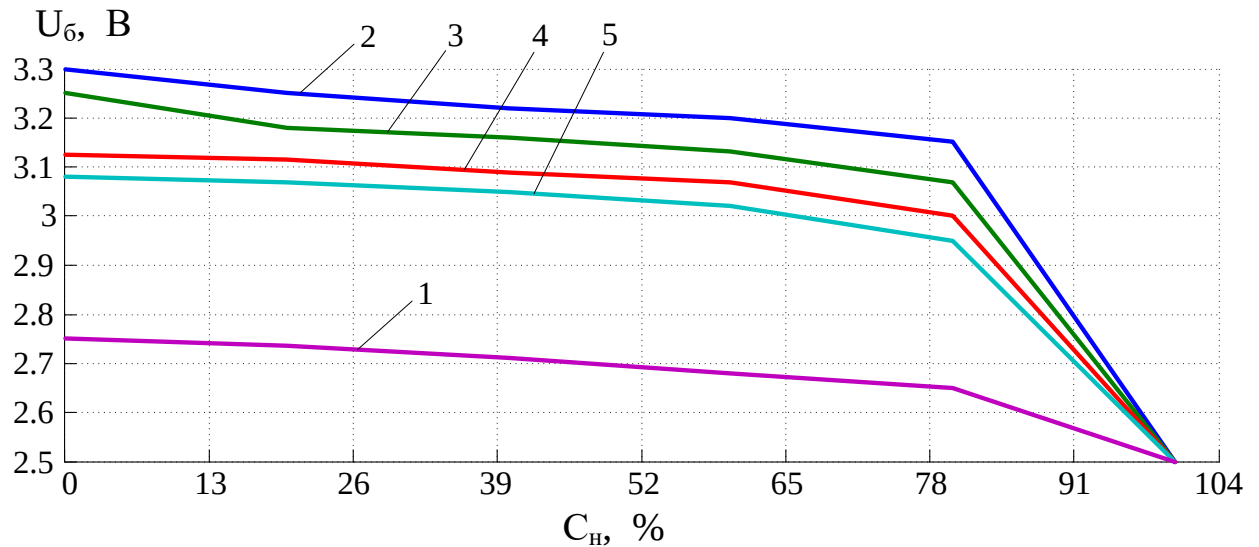


Рисунок 3.8 – Розрядні характеристики акумулятора LT-LYP 770

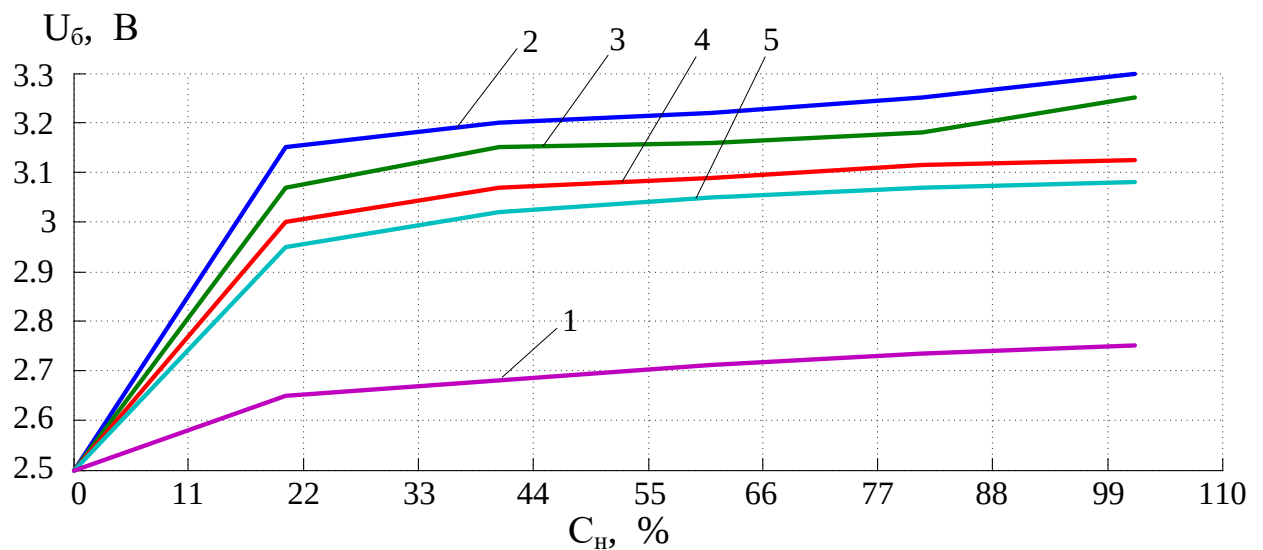


Рисунок 3.9 – Зарядні характеристики акумулятора LT-LYP 770

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

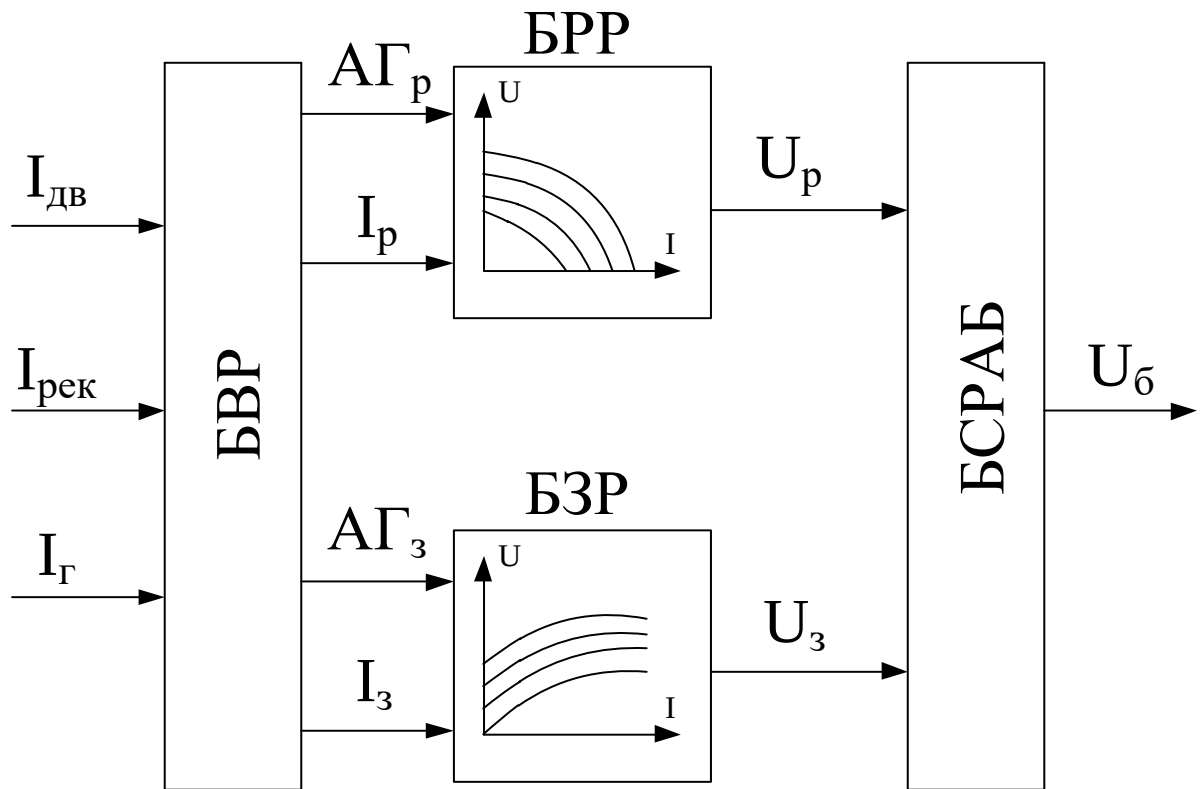


Рисунок 3.10 – Функціональна схема моделі акумуляторної батареї: БВР – блок вибору режиму роботи батареї, БЗР – блок, що реалізує режим заряду, БРР – блок, що реалізує режим розряду, БСРАБ – блок синхронізації режимів роботи АБ

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 $I_{\text{дв}}$, струм двигуна у режимі рекуперації $I_{\text{рек}}$ та зарядний струм від синхронного генератора $I_{\text{Г}}$. 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_p і U_z , які відповідають певному рівню напруги АБ, що, в свою чергу, залежать від амперер-годин її роботи у режимі заряду $АГ_z$ та розряду $АГ_p$, а також від величини розрядного I_p і зарядного I_z струмів. БСРАБ узгоджує між собою два вхідних сигнали U_p і U_z та видає результуюче значення напруги $U_{\text{б}}$ АБ.

Моделювання іоністора виконувалося на основі наступних рівнянь:

- напруга заряду конденсатора

$$U_3 = E_p \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (3.2)$$

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

t – час заряду конденсатора;

τ – стала часу.

- зарядний струм

$$I_3 = \frac{E_p}{R_v} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3.3)$$

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.

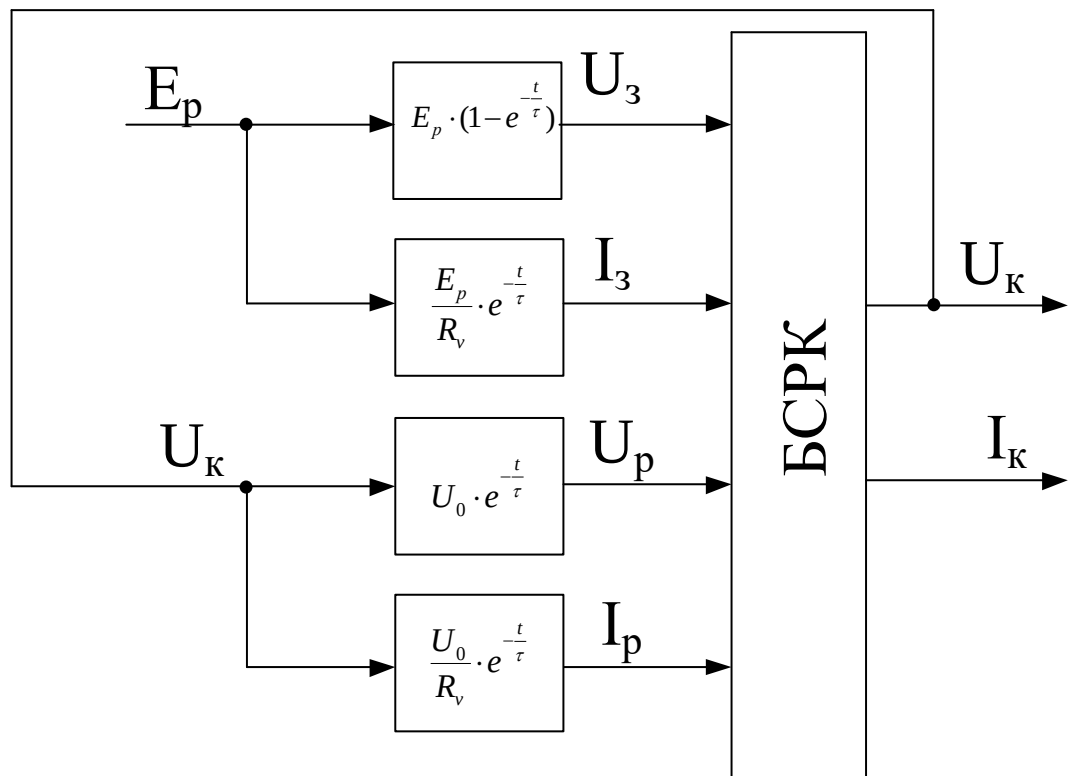


Рисунок 3.11 – Функціональна схема моделі іоністора

Використовуючи рівняння (3.2) та (3.4) були отримані значення напруг U_3 і U_p та струмів I_3 і I_p , які є входніми величинами для БСРК. БСРК, в свою чергу, узгоджує між собою ці сигнали та видає результуюче значення напруги U_K та струму I_K конденсатора.

4 Імітаційне моделювання асинхронного привода

4.1 Моделювання прямого пуску асинхронного двигуна TMF-59-39-4

Найбільш простим способом пуску двигуна з короткозамкненим ротором є включення обмотки його статора безпосередньо в мережу, на номінальну напругу обмотки статора. Такий пуск називається прямим. При цьому пусковий струм двигуна значно перевищує номінальний (у 5-7 разів). Підвищений пусковий струм становить небезпеку для самого двигуна внаслідок збільшення електродинамічних зусиль в лобових частинах обмотки статора і підвищення температури обмоток. При частих або затяжних пусках температура обмоток може перевищити допустимі межі.

Сучасні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором проектується з таким розрахунком, щоб вони за величиною виникають при пуску електродинамічних зусиль, що діють на обмотки, і за умовами нагріву допускали прямої пуск. Тому прямий пуск можливий, коли мережа досить потужна і пускові струми не викликають неприпустимо великих падінь напруги в мережі (не більше 10-15%).

Нормальним способом пуску двигунів з короткозамкненим ротором є прямий пуск. При невеликій інерційності виконавчого механізму частота обертання ротора двигуна швидко досягає сталого значення і пусковий струм також швидко спадає, не викликаючи перегріву обмотки статора. Якщо за умовами падіння напруги в мережі прямий пуск двигуна з короткозамкненим ротором неможливий, застосовуються різні способи пуску двигуна при зниженій напрузі. Однак при цьому пропорційно квадрату напруги на затискачах обмотки статора або квадрату пускового струму двигуна знижується пусковий момент, що є недоліком пуску при зниженій напрузі.

У якості досліджуємого двигуна був обраний тяговий асинхронний двигун TMF-59-39-4 з параметрами, наведеними у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри тягового двигуна TMF-59-39-4

№ з/п	Параметр	Значення
1	Потужність $P_{\text{ном}}$, кВт	600
2	Лінійна напруга $U_{\text{н}}$, В	2340
3	Фазний струм $I_{\text{ф}}$, А	142
4	Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$	0,91
5	Номінальна швидкість n , об/хв	2336
6	ККД, %	95,6
7	Номінальний момент M , Н·м	2919
8	Активний опір статора R_s , Ом	0,5
9	Індуктивний опір статора X_s , Ом	0,33
10	Активний приведенний опір ротора $R_r^{'}$, Ом	0,58
11	Індуктивний приведенний опір ротора $X_r^{'}$, Ом	0,8
12	Індуктивність розсіювання L_m , Гн	0,035
13	Кількість пар полюсів $2p$	4

Для дослідження прямого пуску розглянемо імітаційну модель двигуна у координатах d-q (рисунок 4.1).

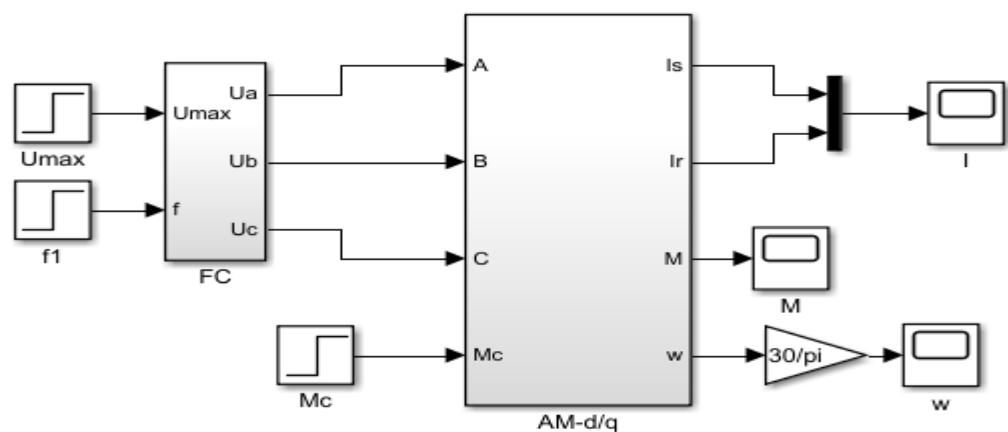


Рисунок 4.1 – Імітаційна модель асинхронного двигуна в координатах d-q

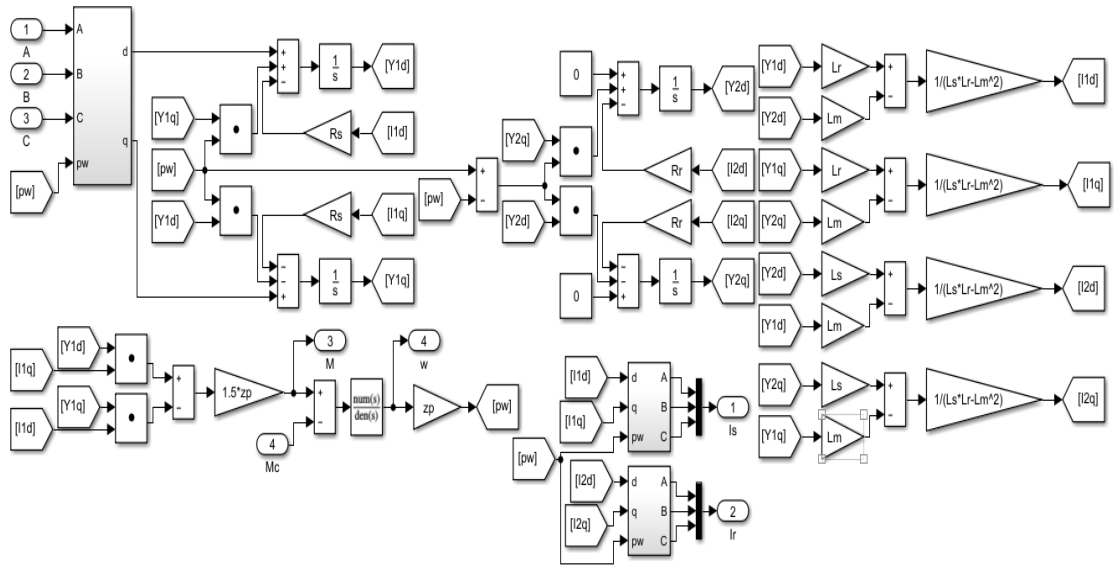


Рисунок 4.2 – Підсистема АМ-d/q

У результаті моделювання прямого пуску були отримані характеристики струму, електромагнітного моменту та швидкості обертання двигуна (рисунки 4.3-4.4).

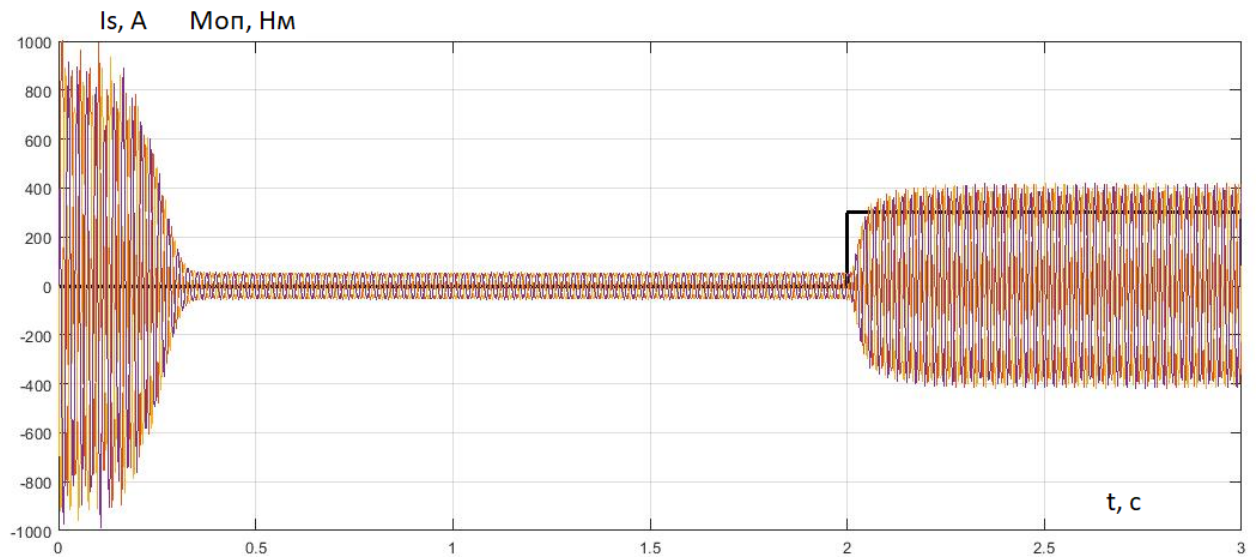


Рисунок 4.3 – Характеристика струму ротора при прямому пуску

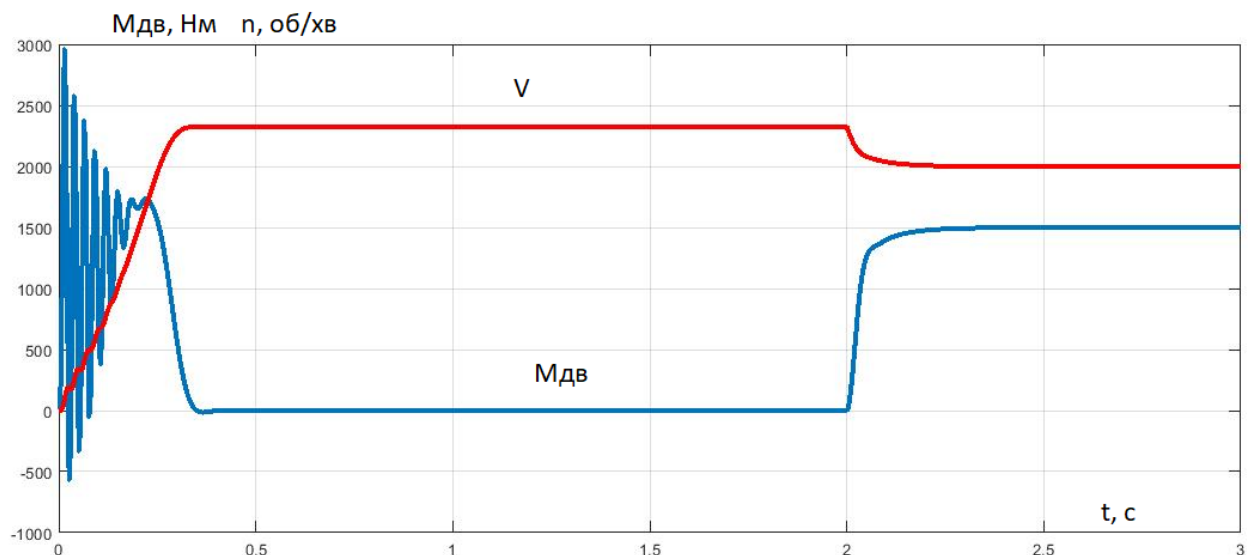


Рисунок 4.4 – Характеристика електромагнітного моменту та швидкості двигуна при прямому пуску

4.2 Загальні теоретичні положення про частотно-керований асинхронний привід

Живлення електричних машин змінного струму із змінною швидкістю обертання здійснюється від пристроїв, що забезпечують на своєму виході регульовану частоту напруги або струму. При застосуванні напівпровідникової техніки напівпровідникові прилади повинні вмикатися і вимикатися в певній послідовності, формуючи вихідну напруга (струм). Раніше в якості таких приладів використовувалися тиристори. Як відомо, закрити вже відкритий тиристор можна тільки подавши на його анод негативну (по відношенню до катода) напругу. Для цих цілей використалися вузли штучної комутації, що складаються, як правило, з тиристорів, конденсаторів, діодів і дроселів. Їх наявність знижувало надійність перетворювачів, збільшувало їх габарити і вартість.

Ситуація радикально змінилася в зв'язку з появою IGBT - транзисторів (Insulated Gate Bipolar Transistor) - пристроїв, які можна закрити по ланцюгу управління. IGBT має біполярний транзистор на виході і польовий на вході. Перший забезпечує високі допустимі струм і напругу, а другий - малі струми

управління. У корпус IGBT вбудований зворотний діод (рисунок 3.7), який забезпечує при необхідності шлях протікання струму зворотної полярності.

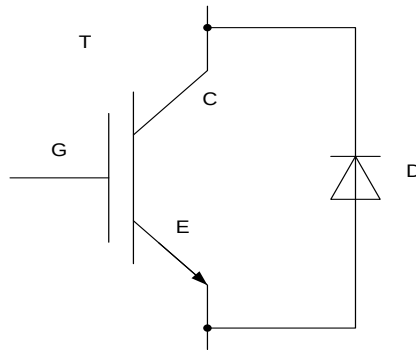


Рисунок 4.7 – IGBT-транзистор

Основним видом перетворювача, який живить регульований по швидкості асинхронний двигун, є інвертор напруги (рисунок 4.9), який складається з трьох частин: джерела постійної напруги, ланки постійного струму і власне інвертора.

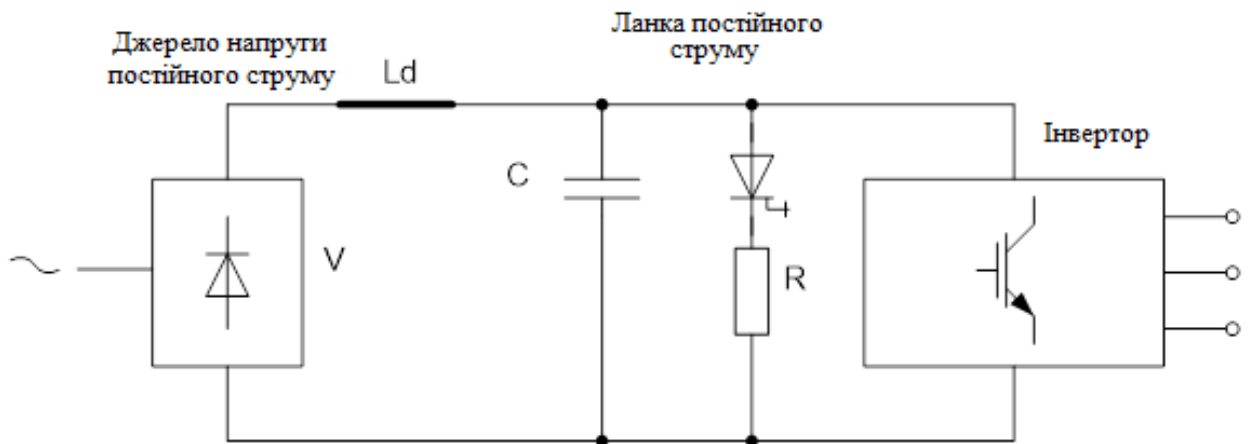


Рисунок 4.9 – Структурна схема інвертора напруги

У якості джерела постійної напруги використовується однофазний мостовий двухнапівперіодний випрямляч (рисунок 4.10).

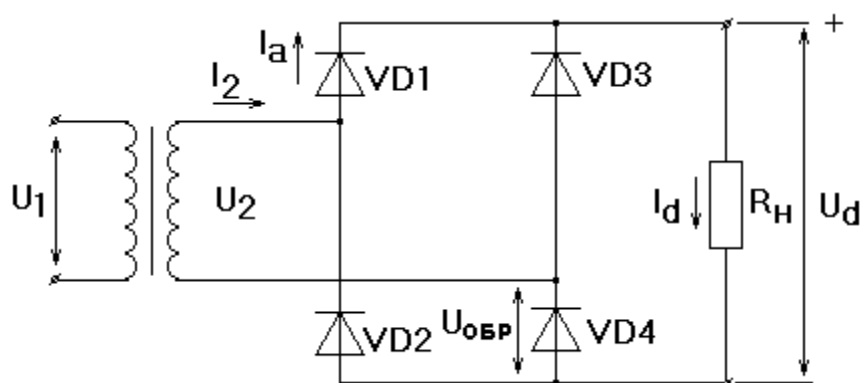


Рисунок 4.10 – Нерегульований вхідний випрямляч

Індуктивність L обмежує аварійний струм установки і швидкість його наростання, зменшує спотворення мережі живлення. Напруга на конденсаторі C дорівнює в середньому $1,35U_c$, де U_c - діюче значення лінійного напруги живлення.

Ланка постійного струму складається з дроселя L_d , конденсатора C і ланцюги напівпровідниковий ключ-резистор R , необхідний для гасіння гальмівної енергії двигуна і захисту конденсатора від перенапруги. Індуктивність L_d в ланцюзі постійного струму служить для зменшення зарядного струму конденсатора і зменшення пульсацій струму.

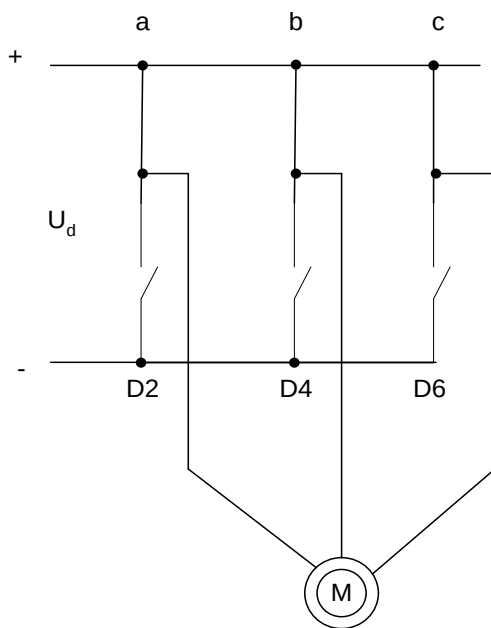


Рисунок 4.11 – Інвертор напруги

Останню частину схеми рисунка 4.9 становить власне інвертор. Простий (або дворівневий) інвертор зображений на рисунку 4.11. Кожен умовно позначений ключ являє собою IGBT. При нормальній роботі в кожній фазі один з ключів замкнутий, а другий розімкнута.

Обраний перетворювач частоти являє собою автономний інвертор напруги (АІН) і містить ємність в ланці постійного струму (силовий фільтр). У АІН має місце однозначна залежність напруги в ланці постійно струму від напруги на навантаженні, і тому він є джерелом напруги. Завдяки наявності ємності, при роботі інвертора як джерела напруги на активно-індуктивне навантаження, яким є АД, забезпечується обмін реактивної енергією між АД і ланкою постійного струму. Форма напруги на виході інвертора визначається порядком перемикавання ключів. Напруга на виході інвертора регулюється широтно-імпульсним способом, який здійснюється модуляцією напруги несучої частоти ω_k (частоти комутації ключів) сигналом основної частоти.

4.3 Математична модель асинхронного двигуна в обертовій системі координат.

АД має трифазну обмотку на статорі і короткозамкненим обмотку на роторі. Його принцип дії заснований на тому, що обертається магнітне поле статора, перетинаючи провідники обмотки ротора, наводить в них напруги-ня, що викликає протікання струму в обмотці ротора. Взаємодія цього струму з потоком статора створює електромагнітний момент, що приводить ротор в обертання. З цього видно, що для створення моменту, що обертає ротор, необхідно, щоб електрична частота (швидкість) обертання ротора ω_r була би менше частоти обертання магнітного потоку статора ω_s , причому $\omega_r = Z_p \omega$, де ω - механічна швидкість обертання ротора, Z_p - число пар полюсів двигуна. Величина $\Delta\omega = \omega_s - \omega_r$ називається абсолютним ковзанням двигуна, а величина $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_{sb}$ - відносним ковзанням, де ω_{sb} - номінальна електрична частота живлення статора (зазвичай $\omega_{sb} = 314 \text{ c}^{-1}$).

Схема заміщення двигуна зображена на рисунку 4.12.

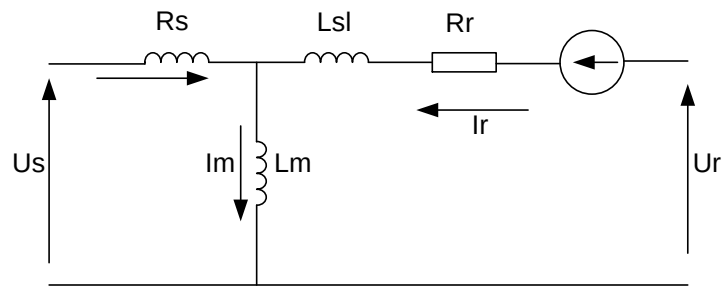


Рисунок 4.12 – Схема заміщення АД

Вибір системи координат і конфігурації моделі, тобто складу вхідних і вихідних сигналів, залежить від структури системи управління, зокрема, від складу сигналів, за допомогою яких організуються зворотні зв'язки, і від особливостей джерела живлення двигуна.

Вдалий вибір математичної моделі є важливим не тільки при аналізі, а й при синтезі системи автоматичного управління. Саме розробка моделі в системі координат, орієнтованої по потокозчепленню ротора, стала основою створення високоякісних систем векторного керування.

Для переходу від математичного опису гармонійних сигналів в багатозафазових координатах до математичного опису в ортогональних двофазних координатах використовується поняття узагальненого вектора.

Узагальненим називають такий вектор, проекції якого на осі фаз рівні миттєвим значенням відповідних фазних величин в заданий момент часу.

Для виконання цього формулювання узагальнений вектор при вугіллі по-ворота фк повинен обертатися проти годинникової стрілки з кутовою швидкістю яка збігається з кутовою швидкістю відповідного періодичного сигналу і мати модуль, який дорівнює максимальному значенню фазної величини

$$\omega_v = \frac{d\phi_v}{dt}, \quad (4.1)$$

$$|\tilde{v}| = v_{max}. \quad (4.2)$$

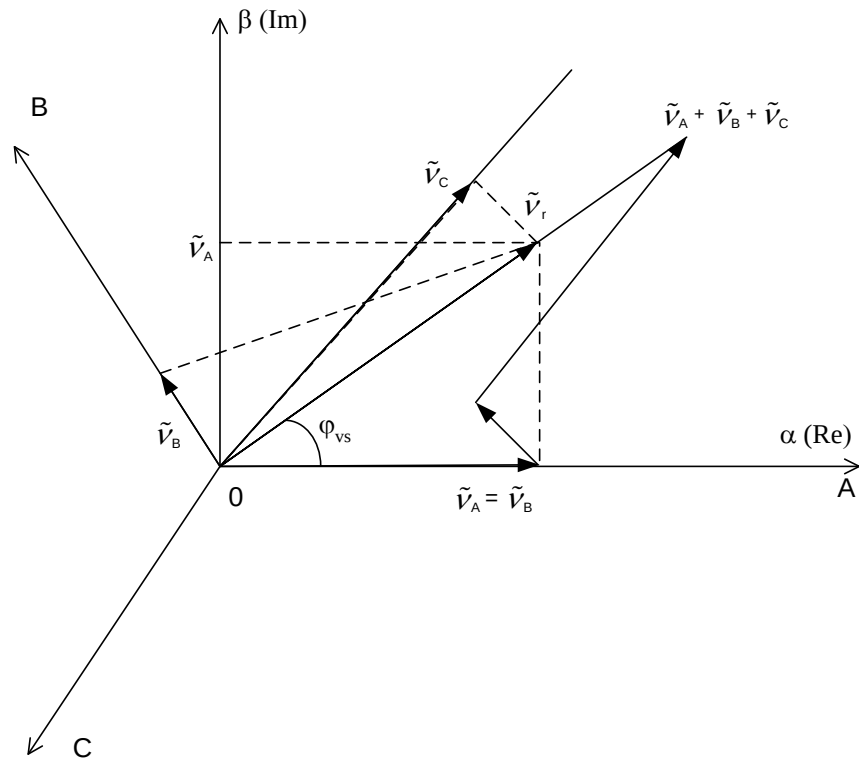


Рисунок 4.13 – Узагальнений вектор і його складові

На рисунку 4.13 зображено узагальнений вектор будь-якої фізичної величини ротора, його проекції на фізичні осі векторна сума цих проекцій і проекції узагальненого вектора на дійсну d (Re) і уявну q (Im) осі, перша з яких (vd) збігається з віссю a , а друга (vq) - розташована перпендикулярно до першої і повернута на кут 90° проти годинникової стрілки.

Для того, щоб напрямок дійсної осі ортогональної системи координат збігалася з напрямком узагальненого вектору поточкозчеплення ротора ψ_r , взятого за основу, система координат повинна обертатися синхронно з цим вектором. При цьому вектор поточкозчеплення ротора в ній буде мати тільки дійсну складову, так як проекція цього вектору на уявну вісь q дорівнюватиме нулю. Тоді умови математичного опису АД в цих координатах матимуть вигляд

$$\omega_k = \omega_{\psi_r}, \quad (4.3)$$

$$\Psi_{rq} = 0; \Psi_{rd} = |\tilde{\Psi}_r| = \Psi_r = \Psi_{rm}. \quad (4.4)$$

Модель в системі координат dq стала основою розробки системи векторного керування короткозамкненим АД. Тому на додаток до умов (4.5), (4.6) додамо умову рівності нулю напруги ротора

$$U_{rd} = U_{rq} = 0. \quad (4.5)$$

При живленні обмоток статора двигуна від джерела напруги система векторного управління має зворотні зв'язки за складовими струму статора і по потокозчеплення ротора. Тому ще однією умовою для розробки моделі АД буде наявність в ній перерахованих сигналів: i_{sd} , i_{sq} , ψ_r .

Запишемо рівняння, що описують процеси в АД, в узагальнених століття-торах з урахуванням умови (4.7):

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = R_s \tilde{i}_s + \frac{d\tilde{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \tilde{\Psi}_s, \\ 0 = R'_r \tilde{i}_r + \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \tilde{\Psi}_r, \end{cases} \quad (4.8)$$

де ω_k - частота обертання системи координат;

ω_r - електрична частота обертання ротора;

U_s , i_s - напруга і струм статора;

R_s - опір обмотки статора;

i_r - струм обмотки ротора;

R'_r - приведений опір обмотки ротора;

Ψ_r - потокозчеплення ротора.

Після певних перетворень та підстановок отримуємо:

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = R_s \tilde{i}_s + \sigma L_s \frac{d\tilde{i}_s}{dt} + k_r \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} + j\omega_k (\sigma L_s \tilde{i}_s + k_r \tilde{\Psi}_r); \\ 0 = \frac{1}{T_r} \tilde{\Psi}_r - \frac{L_m}{T_r} \tilde{i}_s + \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - Z_p \omega_r) \tilde{\Psi}_r, \end{cases} \quad (4.9)$$

де електромагнітна постійна часу

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}.$$

Перепишемо диференційне рівняння в операторній формі:

$$\begin{cases} U_{sd} + \frac{k_r}{T_r} \Psi_r + \omega_k \sigma L_s i_{sq} = i_{sd} R_{sr} (T_{sr} p + 1); \\ U_{sq} - \omega_k \sigma L_s i_{sd} - Z_p \omega k_r \Psi_r = i_{sq} R_{sr} (T_{sr} p + 1); \\ L_m i_{sd} = \Psi_r (T_r p + 1); \\ \omega_k = k_r R_r' \frac{i_{sq}}{\Psi_r} + Z_p \omega. \end{cases} \quad (4.10)$$

В останньому рівнянні системи (4.10) позначимо:

$$\omega_r = Z_p \omega; \Delta \omega_r = k_r R_r' i_{sq} / \Psi_r = \omega_k - Z_p \omega \quad (4.11)$$

Рівняння для електромагнітного моменту двигуна представляється як:

$$M = \frac{3}{2} Z_p k_r \Psi_r i_{sq}. \quad (4.12)$$

При цьому рівняння механічної рівноваги запишеться в звичайному вигляді:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.13)$$

де J - приведений момент інерції електроприводу.

За отриманими вище рівнянням в пакеті Matlab складемо модель короткозамкнутого АД. Вона наведена на рисунку 4.14. Наведена структурна схема може бути використана при дослід-вання асинхронного електроприводу з системою векторного управління при управлінні по потокозчеплення ротора. Модель має два лінійних канали управління, що значно спрощує синтез передавальних функцій регуляторних-торів. При цьому в системі управління

в залежності від параметрів двигуна повинні бути компенсовані внутрішні перехресні зворотні зв'язки з впливами U_{kd} і U_{kq} .

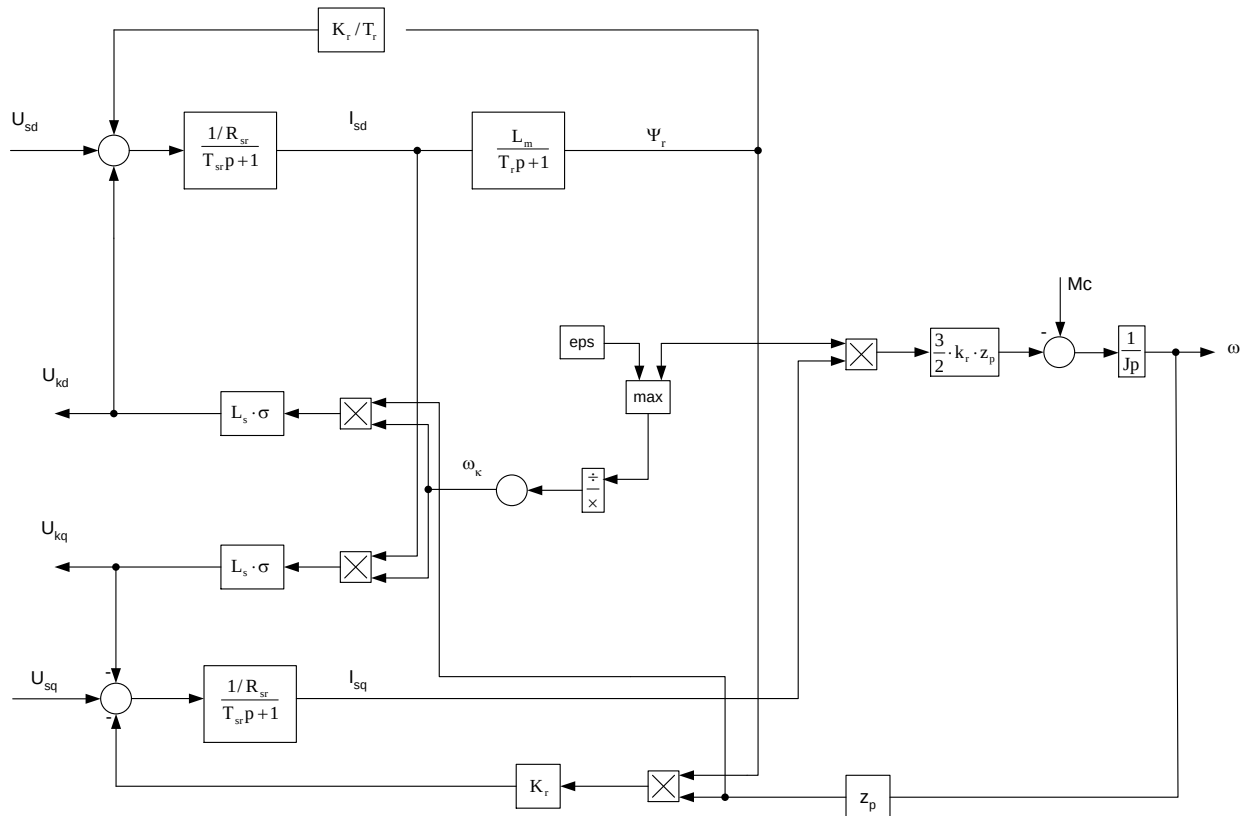


Рисунок 4.14 – Структурна схема АД з КЗ ротором в обертовій системі координат, орієнованій по потокозчепленню ротора

4.4 Розрахунок параметрів двигуна

Розрахуємо динамічні параметри АД. Індуктивності від потоків розсіювання L_{sl} та L_{rl} розраховуються за формулами:

$$L_{sl} = \frac{X_{sl}}{\omega_s}, \quad (4.14)$$

$$L_{rl} = \frac{X_{rl}}{\omega_s}, \quad (4.15)$$

де ω_s – номінальна електрична частота живлення статора, рад / сек;

$$\omega_s = 2\pi f; \quad (4.16)$$

$$\omega_s = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314;$$

$$L_{s1} = \frac{0,58}{314} = 0,0018$$

$$L_{r1} = \frac{0,8}{314} = 0,0025$$

Повні індуктивності обмоток статора і ротора розраховуються за формулами, Гн:

$$L_s = L_m + L_{s1}; \quad (4.17)$$

$$L_r = L_m + L_{r1}; \quad (4.18)$$

$$L_s = 0,0018 + 0,035 = 0,0368 \text{ Гн}$$

$$L_r = 0,0025 + 0,035 = 0,037 \text{ Гн}$$

Коефіцієнти зв'язку ротора і статора визначаються як:

$$k_r = \frac{L_m}{L_r}; \quad (4.19)$$

$$k_s = \frac{L_m}{L_s}. \quad (4.20)$$

Тоді отримуємо :

$$k_r = \frac{0,035}{0,037} = 0,93$$

$$k_s = \frac{0,035}{0,036} = 0,94$$

Результуючий коефіцієнт розсіювання σ і постійні часу, T_r та T_{sr} , розраховуються за формулами:

$$\sigma = 1 - k_r \cdot k_s; \quad (4.21)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}; \quad (4.22)$$

$$T_{sr} = \frac{\sigma \cdot L_s}{R_{sr}}; \quad (4.23)$$

$$R_{sr} = R_s + k_r^2 \cdot R_r \quad (4.24)$$

$$R_{sr} = 0,5 + 0,93^2 \cdot 0,33 = 0,78 \text{ Ом}$$

$$\sigma = 1 - 0,93 \cdot 0,94 = 0,114$$

$$T_r = \frac{0,037}{0,33} = 0,113 \text{ с}$$

$$T_{sr} = \frac{0,114 \cdot 0,036}{0,78} = 0,005 \text{ с}$$

Номінальне ковзання, S_H , визначається як:

$$S_H = \frac{n_s - n_H}{n_s} \quad (4.25)$$

де n_s - синхронна швидкість (швидкість обертання магнітного поля.

$$s = \frac{1500 - 1487}{1500} = 0,87 \%$$

Потокозчеплення статора ψ_{s0} і ротора ψ_{r0} розраховуються по формулам:

$$\psi_{s0} = \frac{U_{\phi_H}}{\omega_s} \quad (4.26)$$

$$\psi_{r0} = k_s \cdot \psi_{s0} \quad (4.27)$$

Підставляючи у формули (4.32, 4.33) числові значення отримуємо:

$$\psi_{s0} = \frac{1376}{314} = 4,38 \text{ Вб}$$

$$\psi_{r0} = 0,94 \cdot 4,38 = 4,16 \text{ Вб}$$

Сучасні системи векторного керування АД, що випускаються електротехнічними фірмами, будуються на базі програмованого мікропроцесорного управління і є цифровими. Однак вони можуть бути представлені своїм аналоговим варіантом. Структурна схема такого ЕП показана на рисунку 4.15.

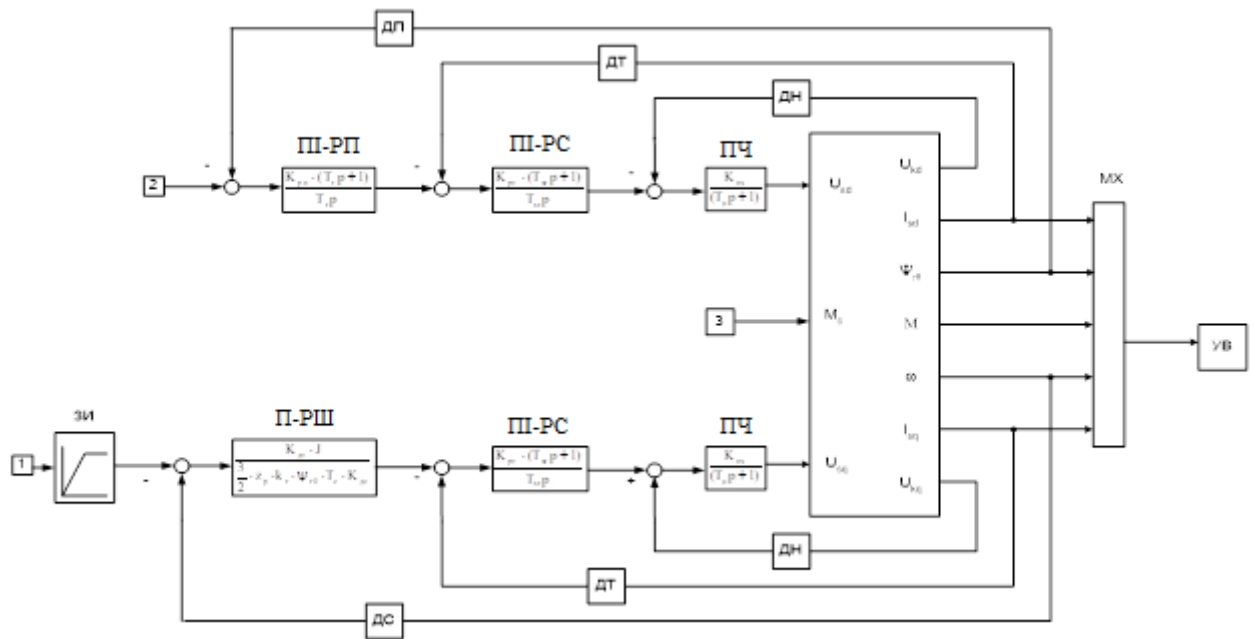


Рисунок 4.15 – Структурна схема векторного керування з компенсацією перехресних зворотних зв'язків об'єкта керування

На схемі рисунку 4.15 позначено:

- 1 - сигнал завдання швидкості, $U_{zc} = 10V$;
- 2 - момент опору, який дорівнює номінальному моменту двигуна, $M_c = M_n$;
- 3 - сигнал завдання потокозчеплення ротора $U_{\psi r0} = 10V$.

4.5 Розрахунок регуляторів

Перетворювач частоти у вигляді АІН будемо представляти, як реальна аперіодична ланка. Малу некомпенсировану постійну часу перетворювача частоти (ПЧ) приймаємо рівною $T_\mu = 0,002$ с. Таким чином, передавальна функція ПЧ матиме вигляд:

$$W_{nc}(p) = \frac{K_{nc}}{T_\mu p + 1} \quad (4.28)$$

де $K_{nc} = 234$ - коефіцієнт посилення перетворювача по напрузі.

Принцип підлеглого регулювання заснований на тому, що всі регулятори повинні компенсувати постійні часу, наявні в об'єкті регулювання. У каналі регулювання швидкості вибираємо пропорційний регулятор швидкості (РС), а в каналі регулювання потоку - пропорційно-інтегральний регулятор потоку ψ_r (РП). Налаштування на модульний оптимум (МО) внутрішніх струмових контурів забезпечується пропорційно-інтегральними (ПІ) - регуляторами со-складових струму i_{sd} і i_{sq} ПІ-РТd, ПІ-РТq з передавальної функцією:

$$W_{nc}(p) = \frac{K_{pm}(T_{sr}p+1)}{T_{sr}p} \quad (4.29)$$

де - коефіцієнт підсилення регулятора струму, який визначається за формулою:

$$K_{pm} = \frac{T_{sr}}{K_{om} \cdot T_m} \quad (4.30)$$

де K_{om} - коефіцієнт посилення об'єкту регулювання РТ;

$T_m = 2 \cdot T_\mu = 0,004$ с - постійна часу контуру струму;

$$K_{дт} = \frac{10}{2,5 \cdot 142} = 0,028$$

$$K_{от} = 137 \cdot 0,028 \cdot \frac{1}{0,78} = 8,37$$

Для забезпечення стабілізації потоку (тобто підтримки його на постійному рівні) синтезується ПІ-регулятор потоку. Передавальна функція якого буде мати вигляд:

$$W_{pn}(p) = \frac{K_{pn}(T_r p + 1)}{T_r p} \quad (4.31)$$

де - коефіцієнт підсилення регулятора потоку, який визначається за формулою:

$$K_{pn} = \frac{T_r}{K_{on} \cdot T_n} \quad (4.32)$$

де K_{on} - коефіцієнт підсилення об'єкта керування РП.

$T_n = 2 \cdot T_m = 0,008$ с – постійна часу контуру потокозчеплення.

$$K_T = \frac{1}{0,028} = 35,5$$

$$K_{дп} = \frac{10}{4,16} = 2,4$$

Таким чином отримуємо:

$$K_{оп} = 35,5 \cdot 2,4 \cdot 0,035 = 2,98$$

$$K_{рп} = \frac{0,113}{2,98 \cdot 0,008} = 4,76$$

Приймаємо $U_{зс} = 10$ В. Виходячи з цього визначається коефіцієнт посилення зворотного зв'язку за швидкістю:

$$K_{\partial c} = \frac{10}{\omega_n} \quad (4.33)$$

$$K_{дс} = \frac{10}{155} = 0,058$$

Тоді отримуємо коефіцієнт підсилення регулятора швидкості:

$$K_{pc} = \frac{0,028 \cdot 15}{\frac{3}{2} \cdot 2 \cdot 0,93 \cdot 4,16 \cdot 0,008 \cdot 0,058} = 77$$

Канал регулювання швидкості є однократноінтегруючим. Таким чином, в системі при набиранні навантаження є просадка швидкості (статична помилка). Завдання на вхід системи подається через задатчик інтенсивності (ЗІ). Постійна часу ЗІ T_{zi} розраховується за співвідношенням, с:

$$T_{zi} = \frac{J \cdot \omega_n}{0,8 \cdot M_n} \quad (4.34)$$

де M_n - номінальний момент двигуна, Н·м:

$$T_{zi} = \frac{15 \cdot 155}{0,8 \cdot 2919} = 0,7$$

Пуск від ЗІ здійснюється для можливості забезпечення постійного прискорення, а також для уникнення інтенсивних коливань моменту і струму, які будуть спостерігатися при прямому пуску. Завдання на систему подається з затримкою 0,06 с. Це необхідно для того, щоб потік в двигуні вийшов на номінальне значення. В результаті моделювання АД з векторним керуванням були отримані наступні характеристики (рисунок 4.16):

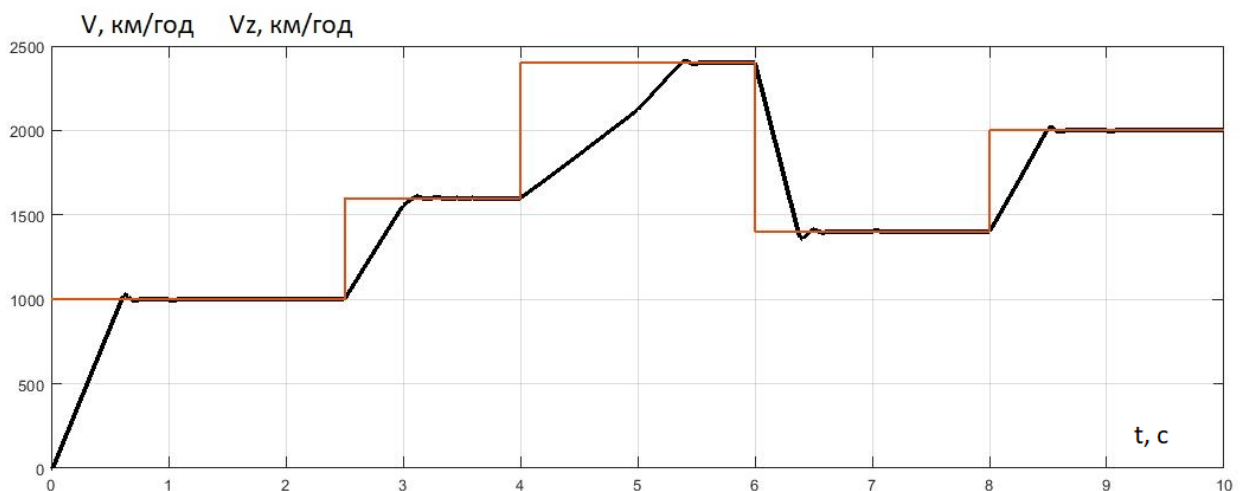


Рисунок 4.16 – Характеристика швидкості обертання двигуна при векторному керуванні, різних моментах навантаження та різних заданих швидкостях

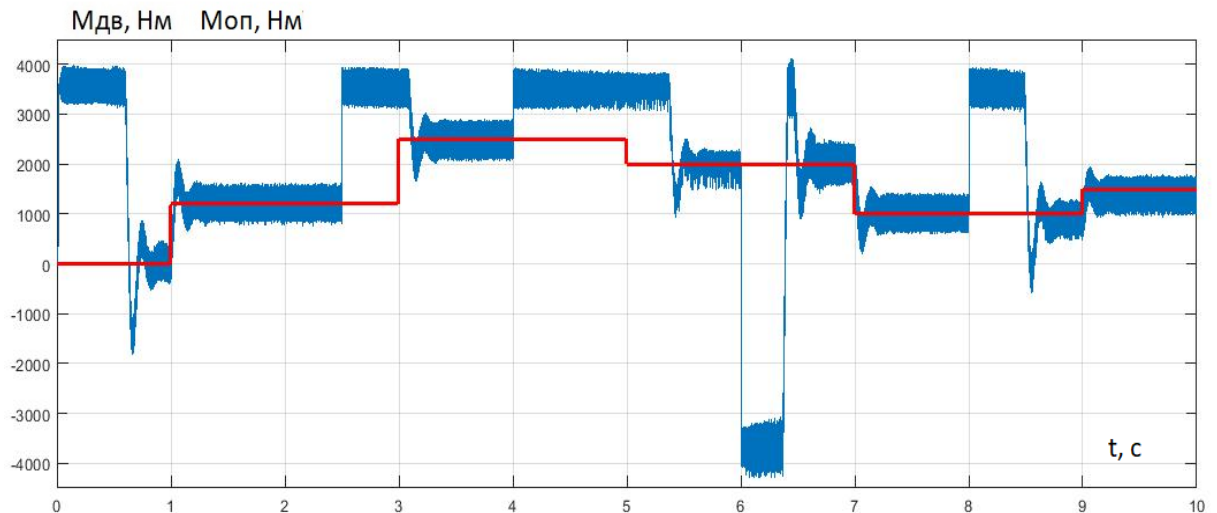


Рисунок 4.16 – Характеристика моменту двигуна при векторному керуванні, різних моментах навантаження та різних заданих швидкостях

З даного графіка видно, що двигун починає розганятися без навантаження, а в певні проміжки часу до двигуна починають прикладуватись різні моменти навантаження. Також на графіку зображений електромагнітний момент двигуна. Крім цього, потокозчеплення ротора підтримується на постійному рівні весь період роботи двигуна.

5 Математичне моделювання гібридного тепловоза з асинхронним приводом

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

На основі загальної функціональної схеми та функціональних схем окремих блоків в середовищі Matlab було складено імітаційну модель роботи гібридного тепловоза, де був застосований асинхронний привід з векторною системою керування. Модель руху поїзда розроблена на основі структурної схеми з використанням профілю, що відповідає ділянці шляху Харків-Мерефа. 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 догальмовуванням пневматичним гальмом.

При дослідженні роботи гібридного тепловозу на імітаційній моделі задавались тахограма обмеження швидкості. На рисунках 5.1 – 5.2 показані осцилограми роботи гібридного тепловоза з 10 вагонами на профілі шляху, що зображений кривою і.

Для підтримання поточної швидкості по заданій тахограмі (крива 1) машиністом проводилась зміна напруги на тягових двигунах шляхом зміни позиції контролера машиніста. Зміна однієї позиції відповідає зміні рівня вихідної напруги широтно-імпульсного перетворювача на 10%. В тяговому режимі струм обмежувався на рівні 600А. Від’ємні значення струму на кривій відповідають режиму рекуперації та заряду акумуляторної батареї. При досягненні напругою іоністора значення 300 В відбувався процес заряду АБ, величини напруги якої показане кривою на рисунку 5.3. На рисунку 5.4 крива показує розход палива при русі потяга. При використанні гібридної системи

розход палива зменшився з 33 кг до 19 кг, тобто на 40%, що відповідає доцільності використання таких систем.

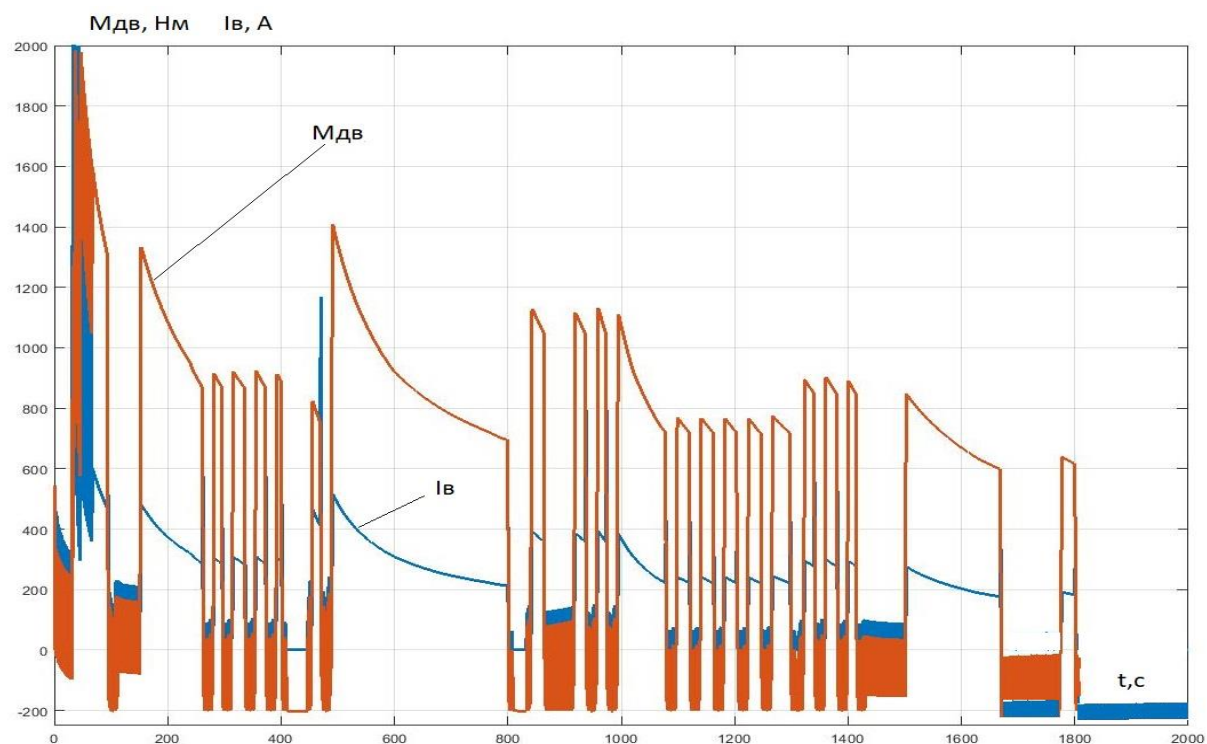


Рисунок 5.1 – Осцилограми моменту тягового двигуна та струму акумуляторної батареї при роботі гібридного локомотива

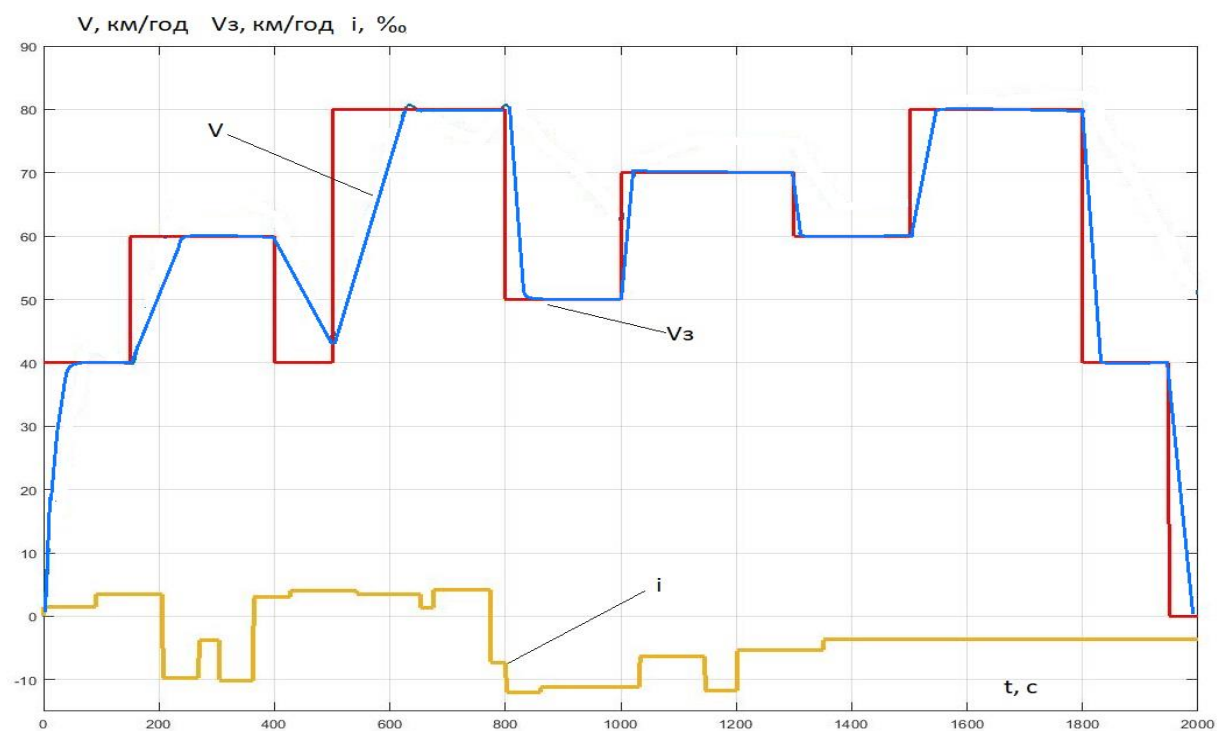


Рисунок 5.2 – Осцилограми швидкості гібридного локомотива з поїздом

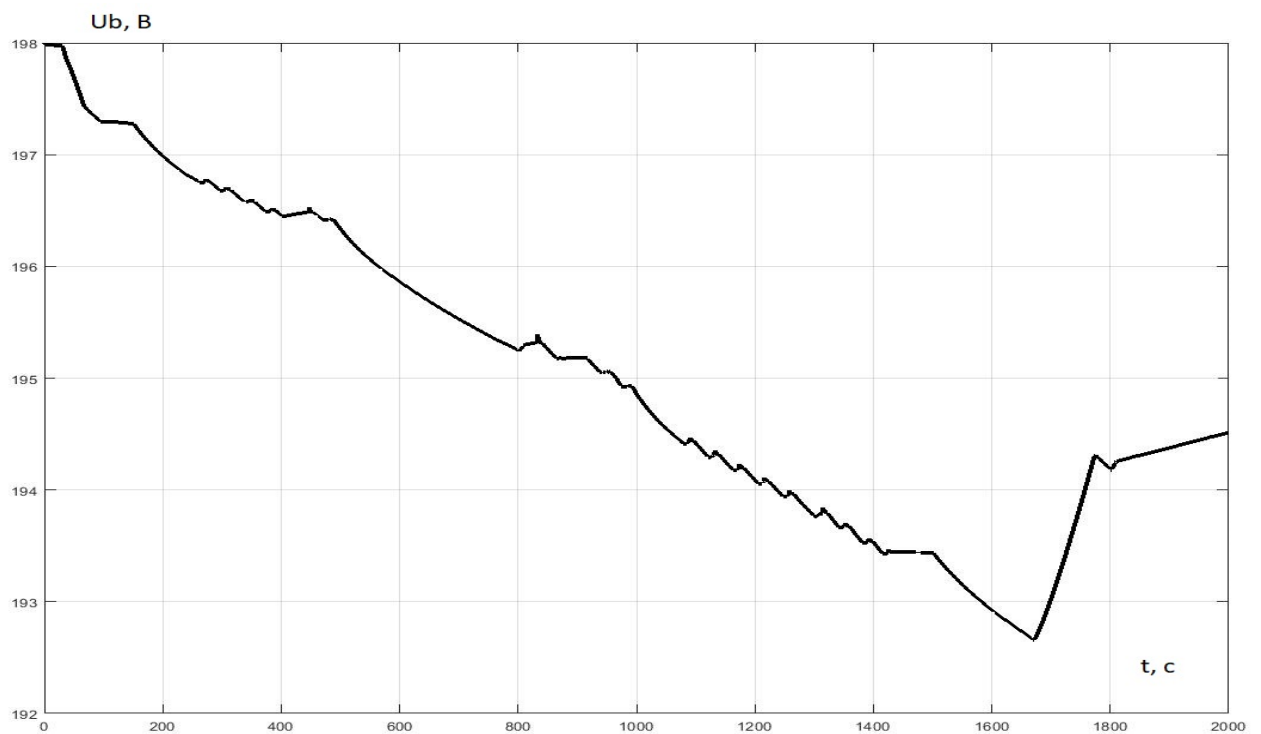


Рисунок 5.3 – Осцилограма рівня напруги акумуляторної батареї гібридного локомотива з поїздом

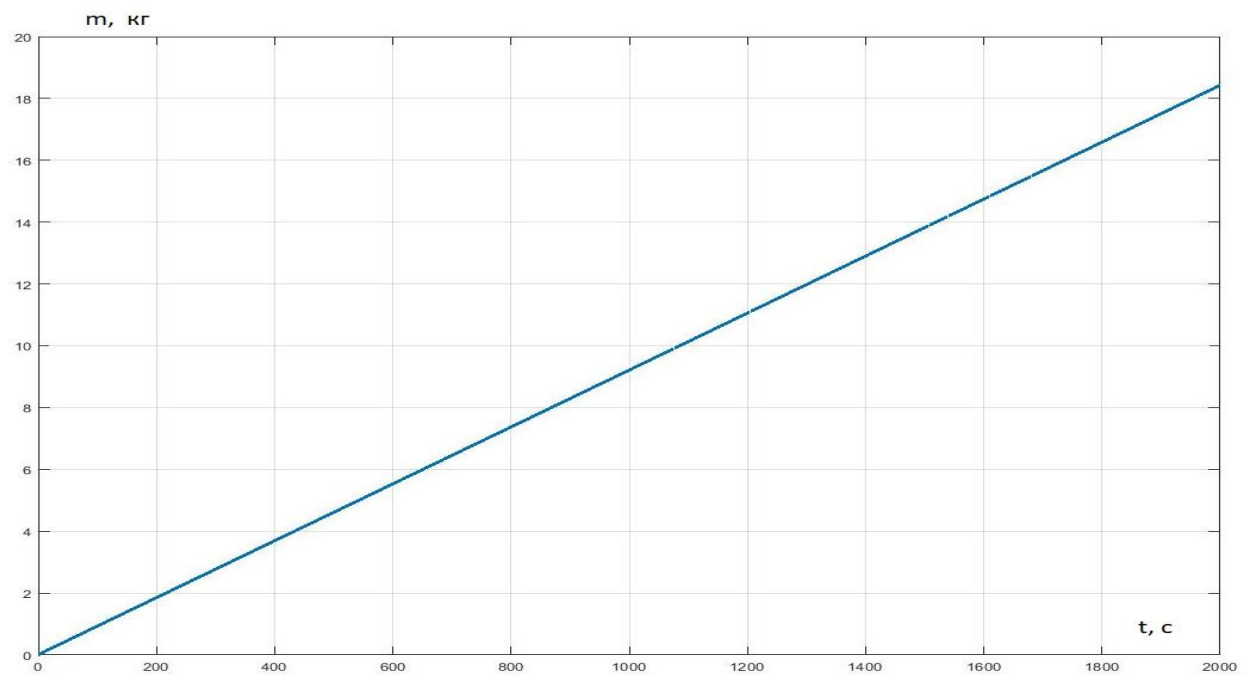


Рисунок 5.4 – Крива витрат палива гібридного локомотива з поїздом

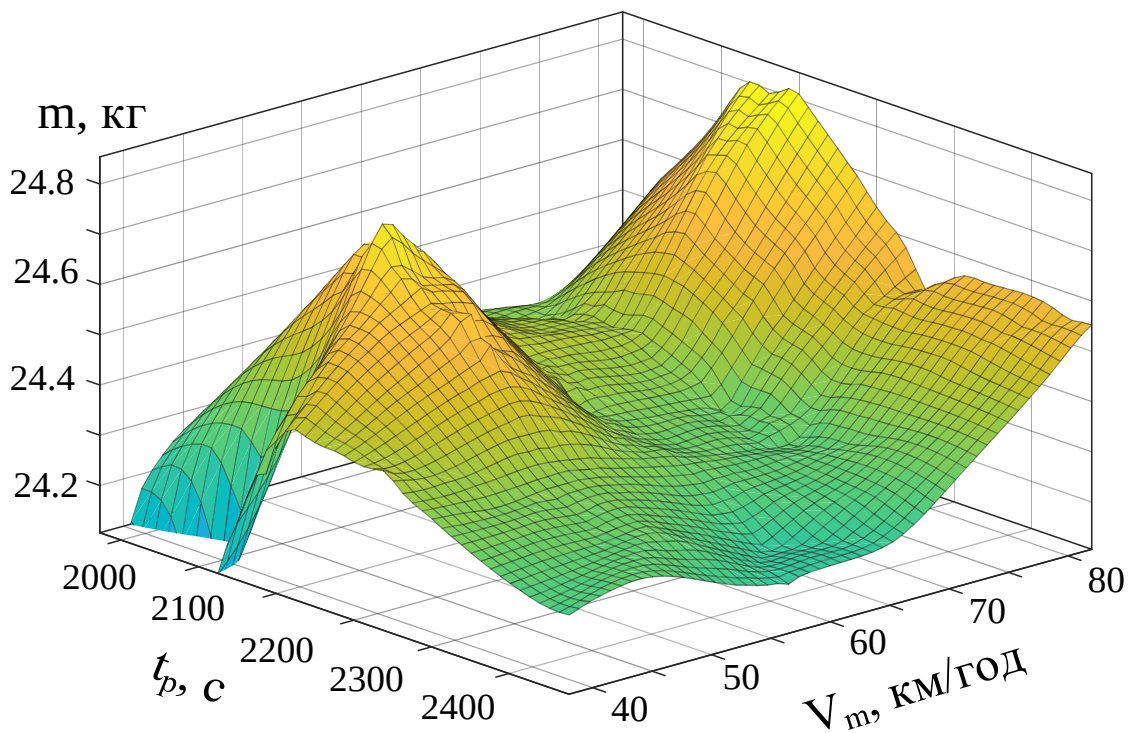


Рисунок 5.5 – Зміна витрат палива гібридним тепловозом з асинхронним приводом в залежності від максимальної швидкості трикутної діаграми

Аналіз отриманих поверхонь показує їх аналогію з залежностями, що спостерігались при використанні ДПС, але для АД 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 на рівні 85 км/год складають 24,92 та 24,89 кг відповідно.

6 Визначення економічного ефекту від застосування гібридної силової установки на тепловозі ЧМЕЗ

6.1 Коротка характеристика запропонованого рішення

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 6.1.

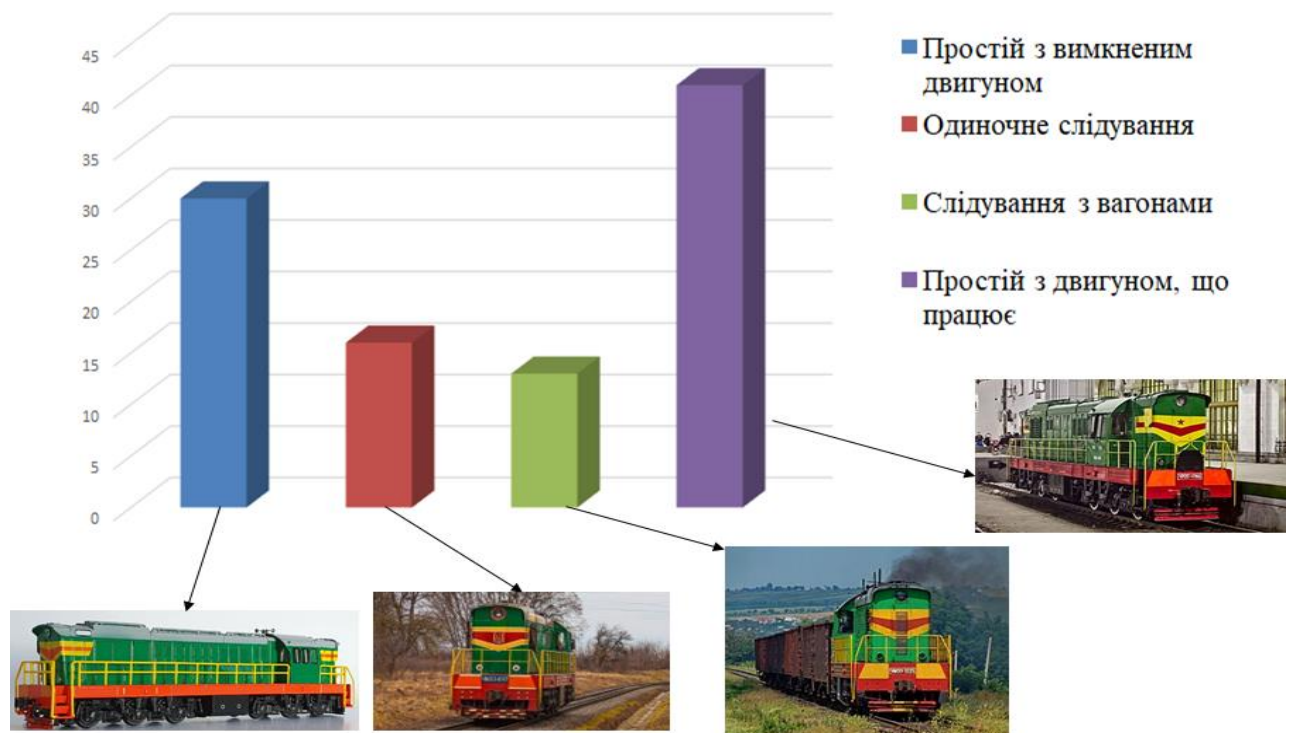


Рисунок 6.1 – Розподілення режимів роботи маневрового локомотива

З вище сказаного видно, що використання потужних маневрових тепловозів не оправдане економічно, тому що використання тепловозів при частковому завантаженні веде до перевитрат палива.

Запропонована модернізація включає встановлення на тепловоз ЧМЕЗ дизеля C18 ACERT, синхронного генератора ГС-500-400, акумуляторної

батареї LT-LYP 240, суперконденсатора ІКЕ 40/96, асинхронних двигунів ТМЕ 42-15 та частотного перетворювача.

6.2 Методика розрахунку економічного ефекту

Сумарний по рокам розрахункового періоду економічний ефект (E_m) визначається як перевищення сумарної вартісної оцінки результатів заходу НТП за розрахунковий період (P_m) над вартісною оцінкою сукупних витрат на здійснення заходу НТП за розрахунковий період ($З_t$):

$$E_m = P_m - З_m \quad (6.1)$$

При розрахунку економічного ефекту проводиться обов'язкове приведення різночасових витрат і результатів до єдиного для всіх варіантів реалізації заходу НТП моменту часу – розрахункового року t_p . Приведення різночасових витрат і результатів всіх років періоду реалізації до розрахункового року здійснюється шляхом множення їхньої величини за кожний рік на коефіцієнт приведення α_t , що визначається за формулою:

$$\alpha_t = (1 + E_n)^{tp-t} \quad (6.2)$$

де E_n – норматив приведення різночасових витрат і результатів, $E_n=0,10$;

t_p – розрахунковий рік;

t – рік, витрати і результати якого приводяться до розрахункового року.

Економічний ефект визначається зменшенням витрат за період у відповідності з встановленими нормативами і розраховується за формулою:

$$E_T = E_T^H - E_T^6 = З_T^6 - З_T^H \quad (6.3)$$

При визначенні затрат необхідно керуватися такими принципами:

- до сумарних витрат на проведення заходу НТП включаються витрати як на розробку і виробництво, так і на використання нової техніки в усіх сферах народного господарства, тобто витрати всіх учасників реалізації заходу;
- до складу витрат входять всі види поточних і одноразових витрат;
- при визначенні сукупних витрат на захід, що охоплює розробку, виробництво і використання нової техніки, не допускається повторне урахування витрат;
- в розрахунках витрат необхідно враховувати їхню динаміку по всім рокам розрахункового періоду.

Витрати на реалізацію заходів НТП за розрахунковий період включають витрати при виробництві та використанні продукції

$$Z_t = Z_t^{\text{п}} + Z_t^{\text{и}} \quad (6.4)$$

де $Z_t^{\text{п}}$ - витрати при виробництві нової техніки на основі заходу НТП за розрахунковий період, грн;

$Z_t^{\text{и}}$ - витрати при використанні нової техніки (без урахування витрат на придбання самої продукції) за розрахунковий період, грн

6.3 Розрахунок економічного ефекту від впровадження гібридної силової установки з асинхронними двигунами

До капітальних вкладень на модернізацію одного тепловозу входять витрати, пов'язані з придбанням дизеля 2884372 грн, синхронного генератора 725308 грн, акумуляторної батареї 12981374 грн, суперконденсатору 1704805 грн, асинхронних двигунів 571380 грн та частотного перетворювача 1669200 грн, витрати на демонтаж базового обладнання і монтаж нового. Для модернізації необхідні 1 дизельний двигун, 1 генератор, 1 акумуляторна та 1

суперконденсаторна батареї, 6 асинхронних двигунів, 1 частотний перетворювач. Загальна вартість обладнання складає 23393339 грн

Розглянемо витрати підприємства на оплату праці працівників та відрахування на соціальні заходи, що пов'язані з демонтажем базового обладнання та монтажем нового обладнання. Трудові витрати на демонтаж базового обладнання та монтаж нового обладнання представлені в таблиці, де розрахована основна і додаткова заробітна плата слюсарів п'ятого розряду по видам виконаних робіт, а також загальна сума трудових витрат.

Витрати складуть, грн

$$B_{\text{МОНТ}} = Z_{\text{М}} \cdot t, \quad (6.5)$$

де t - кількість обладнання;

$Z_{\text{М}}$ - витрати на монтаж обладнання, грн

Трудові витрати на демонтаж складають

$$B_{\text{ДЕМОНТ}} = Z_{\text{Д}} \cdot t, \quad (6.6)$$

де t - кількість обладнання;

$Z_{\text{Д}}$ - витрати на демонтаж обладнання, грн

Таблиця 6.1 – Трудові витрати на демонтаж та монтаж обладнання

Вид робіт	Розряд	Кількість працівників	Годин. тариф. ставка	Кількість годин на одиницю	Основна заробітна плата, грн	Додаткова заробітна плата, грн	Відрах. на соц. заходи, грн.	Усього, грн
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Демонтаж дизеля	5	5	54,7	8	2188	218,8	529,5	2936,3
Демонтаж генератора	5	5	54,7	5	1367,5	136,75	330,94	1835,19

Продовження таблиці 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Демонтаж двигунів	5	3	54,7	8	1312,8	131,28	317,7	1761,78
Демонтаж акумуляторної батареї	5	2	54,7	2	218,8	21,88	52,95	293,63
Монтаж дизеля	5	5	54,7	8	2188	218,8	529,5	2936,3
Монтаж генератора	5	5	54,7	5	1367,5	136,75	330,94	1835,19
Монтаж акумуляторної батареї	5	3	54,7	5	820,5	82,05	198,56	1101,11
Монтаж суперконденс.	5	3	54,7	5	820,5	82,05	198,56	1101,11
Монтаж частотного перетворювача	5	2	54,7	5	547	54,7	132,37	734,07
Монтаж двигунів	5	5	54,7	8	2188	218,8	529,5	2936,3

Затрати на матеріали приймаємо 32233 грн

Підставляємо значення та отримуємо:

$$V_{\text{ДЕМОНТ}} = 2936,3 + 1835,19 + 1761,78 \cdot 6 + 293,63 = 15635,8 \text{ грн}$$

$$V_{\text{МОНТ}} = 2936,3 + 1835,19 + 1101,11 + 1101,11 + 734,07 + 2936,3 \cdot 6 = \\ = 25325,58 \text{ грн}$$

В загальному вигляді капітальні вкладення на модернізацію одного тепловоза складають, грн:

$$\Delta K = \Sigma V_{\text{ПО}} + V_{\text{МОНТ}} + V_{\text{ДЕМОНТ}} + V_{\text{м}}, \quad (6.7)$$

де $\Sigma V_{\text{ПО}}$ – витрати на придбання обладнання, грн;

B_m - витрати на матеріали, грн

Під час проведення демонтажних-монтажних робіт, як правило, виникає необхідність в додаткових затратах на допоміжні матеріали. Витрати на такі матеріали приймаємо на рівні 0,5% від витрат на придбання обладнання:

$$B_m = 0,05 \cdot B_{\text{ПО}} = 0,05 \cdot 23393339 = 119996,7$$

Визначаємо капітальні вкладення на модернізацію одного тепловоза:

$$\begin{aligned} \Delta K &= 23393339 + 15635,8 + 25325,58 + 119996,7 = 23551267 = \\ &= 23551,28 \text{ тис.грн} \end{aligned}$$

У даному розділі розрахунок економічного ефекту базується на отриманні прибутку від нововведення за рахунок економії дизельного палива на роботу тепловоза та витрат на його обслуговування та ремонт.

Одержуємо витрати дизельного палива на роботу одного тепловоза базового варіанту і нового варіанту.

Середньорічний бюджет часу тепловозу

$$K_{\text{об}} = 365 \cdot 24 - (\sum T_{\text{ТР1}} + \sum T_{\text{ТР2}} + \sum T_{\text{ТР3}} + \sum T_{\text{ТО3}} + \sum T_{\text{ТО2}}), \quad (6.8)$$

де, $\sum T_{\text{ТР3}}, \sum T_{\text{ТР2}}, \sum T_{\text{ТР1}}$ - простій на ремонті ПР3, ПР2, ПР1 середньорічний, год;

$\sum T_{\text{ТО3}}, \sum T_{\text{ТО2}}$ - простій на технічному обслуговуванні ТО3 та ТО2 в середньому за рік, год.

Простій на і- виді ремонту за рік

$$\sum T_i = \sum M_i \cdot t_{\text{рем}_i}, \quad (6.9)$$

де $\sum M_i$ - кількість і-тих видів ремонтів за рік;

$t_{\text{рем}_i}$ - норма простою на ремонт і-ого виду ремонту, год.

Кількість ремонтів і-го виду за рік

$$\sum M_i = \frac{t_{\text{річ}}}{t_{\text{рем.і}}}, \quad (6.10)$$

де $t_{\text{річ}}$ - річний фонд робочого часу тепловоза $t_{\text{річ}}=365$ діб;

$$M_{\text{ПР3}} = \frac{t_{\text{річ}}}{30,4 \cdot t_{\text{ПР3}}}; \quad (6.11)$$

$$M_{\text{ПР2}} = \frac{t_{\text{річ}}}{30,4 \cdot t_{\text{ПР2}}} - M_{\text{ПР3}}; \quad (6.12)$$

$$M_{\text{ПР1}} = \frac{t_{\text{річ}}}{30,4 \cdot t_{\text{ПР1}}} - M_{\text{ПР2}}; \quad (6.13)$$

$$M_{\text{ТО3}} = \frac{t_{\text{річ}}}{t_{\text{ТО3}}} - M_{\text{ПР1}}, \quad (6.14)$$

де $t_{\text{ПР3}}, t_{\text{ПР2}}, t_{\text{ПР1}}, t_{\text{ТО3}}$ - міжремонтні періоди;

$$t_{\text{ПР3}}=36 \text{ міс.};$$

$$t_{\text{ПР2}}= 18 \text{ міс.};$$

$$t_{\text{ПР1}}=9 \text{ міс.};$$

$$t_{\text{ТО3}}=45 \text{ діб.}$$

$$\sum M_{\text{ПР3}} = \frac{365}{36 \cdot 30,4} = 0,334$$

$$\sum M_{\text{ПР2}} = \frac{365}{18 \cdot 30,4} - 0,334 = 0,333$$

$$\sum M_{\text{ПР1}} = \frac{365}{9 \cdot 30,4} - 0,333 = 1,67$$

$$\sum M_{\text{ТО3}} = \frac{365}{45} - 1,67 = 6,44$$

Розрахуємо кількість ТО-2 за рік:

$$\sum M_{\text{ТО-2}} = \frac{365}{2} - \sum M_{\text{ТР3}} - \sum M_{\text{ТР2}} - \sum M_{\text{ТР1}} - \sum M_{\text{ТО3}} \quad (6.15)$$

$$\sum M_{\text{ТО-2}} = \frac{365}{2} - 0,334 - 0,333 - 1,67 - 6,44 = 173,72$$

Таким чином середньорічний простій тепловозу на і-му виді ремонту складає

$$\sum T_{\text{ПР3}} = 0,334 \cdot 120 = 40,08 \text{ год.},$$

$$\sum T_{\text{ПР2}} = 0,333 \cdot 96 = 31,97 \text{ год.},$$

$$\sum T_{\text{ПР1}} = 1,67 \cdot 24 = 40,08 \text{ год.},$$

$$\sum T_{\text{ТО3}} = 6,44 \cdot 12 = 77,28 \text{ год.},$$

$$\sum T_{\text{ТО2}} = 173,72 \cdot 0,5 = 86,86 \text{ год.}$$

Ефективний фонд робочого часу тепловоза

$$T_{\text{еф}} = 365 \cdot 24 - (40,08 + 31,97 + 40,08 + 77,28 + 86,86) = 8483,73 \text{ год.}$$

Весь ефективний фонд робочого часу поділяється на чотири режими роботи: простій з вимкненим двигуном 30% фонду робочого часу, простій з двигуном, що працює, 41%, одиночне слідування 13%, слідування з вагонами 16%. Звідси маємо:

$$t_{\text{вимк.дв.}} = 0,3 \cdot 8483,73 = 2545,12 \text{ год.}$$

$$t_{\text{прац.дв.}} = 0,41 \cdot 8483,73 = 3478,33 \text{ год.}$$

$$t_{\text{од.слід.}} = 0,13 \cdot 8483,73 = 1102,88 \text{ год.}$$

$$t_{\text{слід.ваг.}} = 0,16 \cdot 8483,73 = 1357,4 \text{ год.}$$

Витрати палива тепловозом розраховуємо виходячи з годинних витрат палива дизелем, що наведені у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Годинні витрати палива тепловозом

Показник	Позиція контролера машиніста								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Витрати палива, кг/год	8	31	63	96	110	120	160	174	180

При маневровій роботі існує наступне розподілення позицій контролера машиніста, що отримане на основі статистичних даних, яке наведене у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Розподілення позицій контролера машиніста при маневровій роботі

Показник	Позиція контролера машиніста							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Час роботи, %	8,99	32,11	32,11	16,15	7,52	2,2	0,55	0,37

Річні витрати палива тепловозом при слідуванні з вагонами:

$$\begin{aligned} V_{\text{ДПслід.ваг.}} &= 1357,4 \cdot (0,0899 \cdot 31 + 0,3211 \cdot 63 + 0,3211 \cdot 96 + 0,1615 \cdot 110 \\ &\quad + 0,0752 \cdot 120 + 0,022 \cdot 160 + 0,0055 \cdot 174 + 0,0037 \cdot 180) \\ &= 116,43 \text{ т} \end{aligned}$$

При одиночному слідуванні найчастіше використовується 3 позиція контролера машиніста, тому річні витрати палива тепловозом при одиночному слідуванні складають:

$$V_{\text{ДПод.сл}\rightarrow\text{ід.}} = 1102,88 \cdot 63 = 69,48 \text{ т}$$

Річні витрати при простої з двигуном, що працює, складають:

$$V_{\text{ДПпрац.двиг.}} = 3478,33 \cdot 8 = 27,83 \text{ т}$$

Річна витрата палива базовим тепловозом складе:

$$V_{\text{ДП.Заг.}} = 116,43 + 69,48 + 27,83 = 213,74 \text{ т}$$

Визначимо річні витрати на дизельне паливо $Z_{\text{П}}^{\text{Д}}$ за формулою:

$$V_{\text{П}}^{\text{Д}} = V_{\text{ДП.Заг.}} \cdot C_{\text{П}}, \quad (6.16)$$

де $C_{\text{П}}$ - ціна дизельного палива за 1 тону, $C_{\text{П}} = 65 \text{ тис.грн/т}$

$$V_{\text{П.Б.}}^{\text{Д}} = 213,74 \cdot 65 = 13893,1 \text{ тис.грн}$$

У модернізованому варіанті дизельний двигун працює тільки у випадку слідування з вагонами на номінальній частоті обертання колінчастого валу

дизеля. У цьому режимі витрати палива складають 86 кг/год. Річна витрата палива складе:

$$V_{\text{ДП.Заг.}} = 1357,4 \cdot 86 = 116,73 \text{ т}$$

Витрати на паливо складуть:

$$V_{\text{П.М.}}^{\text{Д}} = 116,73 \cdot 65 = 7587,45 \text{ тис.грн}$$

Загальна економія за рахунок зменшення споживання палива тепловозом складе:

$$\Delta E_{\text{пал.річ.}} = V_{\text{П.Б.}}^{\text{Д}} - V_{\text{П.М.}}^{\text{Д}} \quad (6.17)$$

$$\Delta E_{\text{пал.річ.}} = 13893,1 - 7587,45 = 6305,65 \text{ тис.грн}$$

Визначаємо економію витрат на ремонт:

Таблиця 6.4 – Визначення загальної вартості ремонту базового тепловоза

Вид ремонту	Кількість ремонтів	Вартість ремонту, грн	Кількість одиниць, шт	Вартість ремонту обладнання тепловозу, грн
Вартість ремонту дизеля К6S310DR				
ПР3	0,334	1896,7	1	633,50
ПР2	0,333	1254,89	1	417,88
ПР1	1,67	598,41	1	999,34
ТО3	6,44	372,95	1	2401,80
ТО2	173,72	285,74	1	49638,75
Разом				54091,27

Вартість ремонту генератора постійного струму				
ПР3	0,334	895,21	1	299,00
ПР2	0,333	427,58	1	142,38
ПР1	1,67	211,53	1	353,26
ТО3	6,44	154,68	1	996,14
ТО2	173,72	128,46	1	22316,07
Разом				24106,85
Вартість ремонту двигунів постійного струму				
ПР3	0,334	902,21	6	1808,03
ПР2	0,333	468,73	6	936,52
ПР1	1,67	208,84	6	2092,58
ТО3	6,44	161,95	6	6257,75
ТО2	173,72	124,51	6	129779,26
Разом				140874,14
Загальні витрати на ремонт				219072,26

Таблиця 6.5 – Визначення загальної вартості ремонту модернізованого тепловоза

Вид ремонту	Кількість ремонтів	Вартість ремонту, грн	Кількість одиниць, шт	Вартість ремонту обладнання тепловозу, грн
1	2	3	4	5
Вартість ремонту дизеля				
ПР3	0,334	2496,36	1	833,78
ПР2	0,333	1549,12	1	515,86
ПР1	1,67	657,24	1	1097,59
ТО3	6,44	372,95	1	2401,80
ТО2	173,72	285,74	1	49638,75
Разом				54487,78
Вартість ремонту синхронного генератора				
ПР3	0,334	1258,96	1	420,49
ПР2	0,333	986,34	1	328,45
ПР1	1,67	158,93	1	265,41

ТО3	6,44	0	1	0
ТО2	173,72	0	1	0
Разом				1014,36
Вартість ремонту акумуляторної та суперконденсаторної батарей				
ПР3	0,334	152,34	1	50,88
ПР2	0,333	98,64	1	32,85
ПР1	1,67	46,52	1	77,69
ТО3	6,44	28,15	1	181,29
ТО2	173,72	16,8	1	2918,50
Разом				3261,20
Вартість ремонту статичного перетворювача				
ПР3	0,334	202,87	1	67,76
ПР2	0,333	158,9	1	52,91
ПР1	1,67	115,8	1	193,39
ТО3	6,44	0	1	0
ТО2	173,72	0	1	0
Разом				314,06
Вартість ремонту асинхронних двигунів				
ПР3	0,334	501,95	6	1005,91
ПР2	0,333	398,45	6	796,10
ПР1	1,67	325,84	6	3264,92
ТО3	6,44	0	6	0
ТО2	173,72	0	6	0
Разом				5066,93
Загальні витрати на ремонт				64144,32

При виконанні ТО-2, ТО-3 тепловозу завжди проводять огляд та обслуговування колекторних машин (двигунів та генератора). При заміні колекторних машин на безколекторні огляд виконувати не потрібно. Тим самим зменшується час виконання технічного обслуговування та затрати на його проведення.

Таким чином річна економія поточних витрат на ремонт тепловоза

$$\Delta E_{\text{річ}}^{\text{рем}} = 219072,26 - 64144,32 = 154927,94 \text{ грн.} = 154,93 \text{ тис. грн}$$

Загальна економія витрат складе

$$\Delta E_{\text{річ}}^{\text{заг}} = 6305,65 + 154,93 = 6460,58 \text{ тис.грн}$$

Розрахунок економічного ефекту здійснюється у табличній формі (таблиця 6.6).

Таблиця 6.6 – Розрахунок економічного ефекту за роками експлуатації

Показник	Розрахунковий період (роки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Капітальні вкладення K_t , тис.грн	23551,28									
Економія поточних витрат Δu_t , тис. грн	6460,58	6460,58	6460,58	6460,58	6460,58	6460,58	6460,58	6460,58	6460,58	6460,58
Економічний ефект E_t , тис.грн	-17090,7	6460,58	6460,58	6460,58	6460,58	6460,58	6460,58	6460,58	6460,58	6460,58
Коефіцієнт приведення α_t	0,909	0,826	0,751	0,683	0,621	0,564	0,513	0,467	0,424	0,386
Економічний ефект з урахуванням приведення $E_t \cdot \alpha_t$	-15537	5339,3	4853,9	4412,7	4011,5	3646,8	3315,3	3013,9	2739,9	2490,8

Економічний ефект наростаючим підсумком $E_1 +$ $E_2 + \dots + E_k$ ис.грн	-15537	-10197,7	-5343,7	-931,1	3080,4	6727,3	10042,6	13056,5	15796,4	18287,2
--	--------	----------	---------	--------	--------	--------	---------	---------	---------	---------

З таблиці видно, що за життєвий цикл обладнання у 10 років економічний ефект складе 18287,8 тис.грн, що вказує на доцільність запропонованої модернізації тепловозу ЧМЕЗ. Час повернення коштів, що пішли на капітальні затрати – 5 років.

Висновки

Для удосконалення роботи тягового електроприводу було розроблено математичну модель базової системи, що використовується на тепловозах типу ЧМЕЗ, та проведено її детальний аналіз. Моделювання функціонування локомотива виконано блоковим методом, що дозволило дослідити взаємодію окремих елементів енергетичної системи й оцінити їхній вплив на динаміку руху.

З метою підвищення енергоефективності та відповідності сучасним вимогам до екологічності й економічності, було запропоновано застосувати гібридну силову установку комбінованого типу. Така система поєднує дизель-генераторну установку (ДГУ) невеликої потужності з накопичувачами енергії — тяговою акумуляторною батареєю та суперконденсаторним блоком. Подібне технічне рішення дає можливість зменшити витрати пального щонайменше на 40%, оскільки більшість маневрових операцій виконується за рахунок електроенергії, накопиченої у батареях. Крім того, гібридна схема суттєво знижує рівень шкідливих викидів і забезпечує стабільну роботу локомотива у різних режимах навантаження.

Електроприводи зі статичними перетворювачами (СПК) сьогодні є найбільш поширеним технічним рішенням у транспортному машинобудуванні, особливо там, де потрібне плавне регулювання швидкості обертання в широкому діапазоні — у тому числі й у системах тягового електроприводу залізничного транспорту.

Для покращення якості керування в системі застосовано модальний регулятор, який є безінерційним і функціонує у ланцюгу зворотного зв'язку. На його вхід надходять сигнали від усіх каналів зворотного зв'язку, що дозволяє оперативно коригувати параметри роботи двигуна відповідно до змін зовнішніх умов.

У випадках, коли частину змінних стану неможливо виміряти безпосередньо, використовується спостерігач стану, що дає змогу відновлювати відсутні параметри системи. Такі задачі належать до сфери керування з неповною інформацією, де необхідно компенсувати збурення та забезпечити стабільність роботи електроприводу навіть при обмежених даних про стан об'єкта.

У межах запропонованої модернізації передбачається встановлення дизельного двигуна C18 ACERT, синхронного генератора ГС-500-400, акумуляторної батареї типу LT-LYP 240, суперконденсаторного модуля ІКЕ 40/96 та асинхронного тягового двигуна. Такий комплекс обладнання забезпечує високу енергоощадність, стабільність у перехідних режимах і довговічність експлуатації.

Розрахунки економічної ефективності модернізації показали, що за десять років експлуатації очікуваний економічний ефект становитиме близько 15,5 млн грн, що свідчить про доцільність та окупність проєкту. Термін повного повернення інвестицій становить близько п'яти років, після чого модернізований тепловоз ЧМЕЗ починає приносити чисту економічну вигоду.

Список використаних джерел

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
2. Astrom K.J. Advanced PID Control [Текст] / Astrom K.J., Hagglund T. - Instrumentation, Systems, and Automation Society, USA, 2006. – 250 p.
3. Гоголюк П. Ф., Гречин Т. М. Теорія автоматичного керування: Підручник., – Л.: Львівська політехніка, 2012. – 280 с
4. Ладанюк А.П. Теорія автоматичного керування: курс лекцій (частина перша) – К.: НУХТ, 2004 – 124 с.
5. Основи електроприводу: Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.Ю. Синявський, В.В. Савченко; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К. 2010.
6. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.
7. Electrical Drives. Principles-Planning-Applications-Solutions. Jens Weidauer, Richard Messer / Siemens, 2015, англійською мовою.
8. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму: Навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.М. Пижов, Н.Д. Красношопка, М.Я. Островерхов. – К.: 2020.
- 9 Сенько, В.І. Електроніка і мікросхемотехніка. Елементна база електронних пристроїв. [Текст]: Підручник у 4-х томах / В.І. Сенько, за ред. В. І. Сенька. Т.1. – К.: Обереги, 2000. – 300 с.
- 10 Банєв, Є.Ф. Енергоресурсозберігаючий електропривод ескалатора метрополітена [Текст]: дис. к.т.н.: 05.09.03 / Є.Ф. Банєв. Харків, 2013. – 140 с.
- 11 Чорний, О.П. Моделювання електромеханічних систем [Текст] / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В. Садовой – Кременчук, 2001. – 376 с.
- 12 Приймак, Б.І. Нечітке керування електротехнічними об'єктами [Текст] / Б.І. Приймак, М.М. Бондаренко, О.М. Халімовський // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №10. – С. 308-311.

Додаток А
Ілюстраційний матеріал

Підвищення енергоефективності маневрового тепловоза ЧМЕЗ шляхом застосування накопичувачів енергії



Розробив:
студент групи 214-ЕЕП-324
Денис КОСТЕНКО

Керівник:
к.т.н., доц. Андрій МАСЛІЙ

- Розробка імітаційної моделі основних складових тепловоза ЧМЕЗ та дослідження його роботи по заданому профілю.
- Розробка запропонованої гібридної системи з накопичувачами енергії на базі тепловозу ЧМЕЗ.
- Створення імітаційної моделі роботи гібридного маневрового тепловоза з асинхронним приводом;
- Аналіз роботи нової систем на маневровому тепловоза;
- Економічне обґрунтування доцільності модернізації тепловоза.

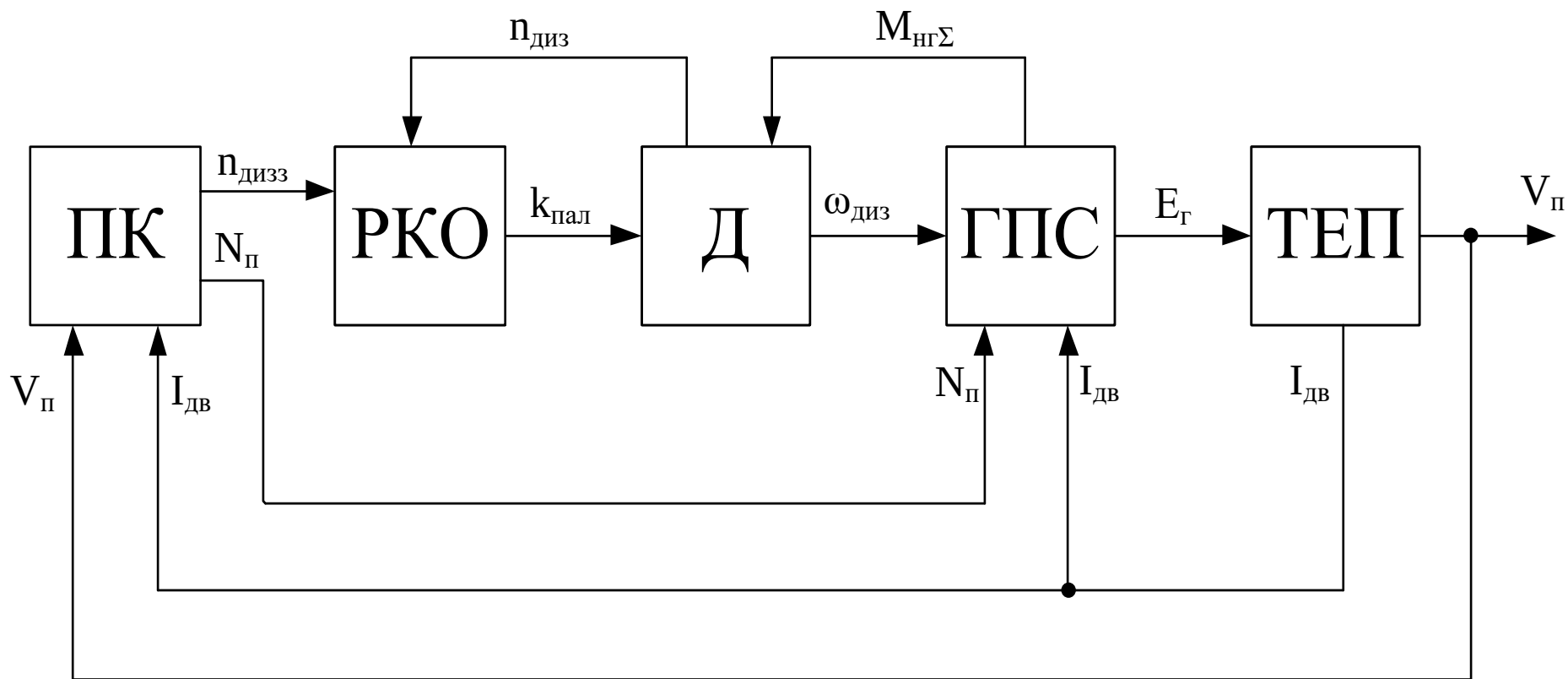
Загальний вигляд тепловоза ЧМЕЗ

3



Показник	Величина
Зчіпна 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 коліс, мм	1050
Дизель	K6S310DR
Номінальна потужність дизеля, к.с.	1350
Тип передачі	електрична
Генератор	TD-802
Потужність генератора, кВт	885

Функціональна схема моделі тепловозу ЧМЕЗ



Структурні схеми основних вузлів тепловоза ЧМЕЗ 5

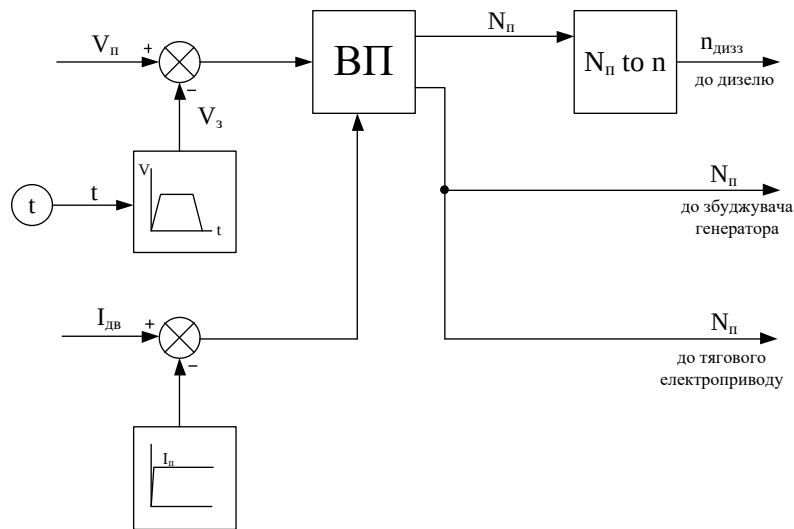


Рисунок 1 – Структурна схема моделі пульта керування

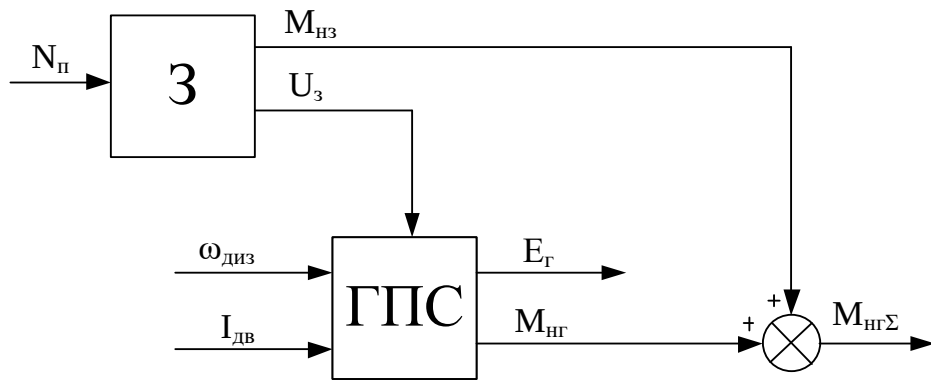


Рисунок 3 – Структурна схема імітаційної моделі роботи генератора постійного струму зі збуджувачем

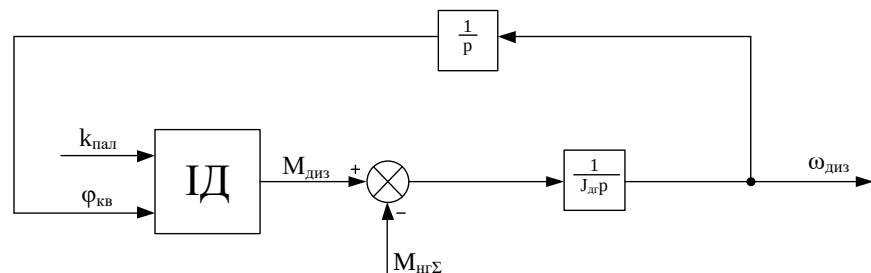


Рисунок 3 – Структурна схема імітаційної моделі роботи дизеля K6S310DR

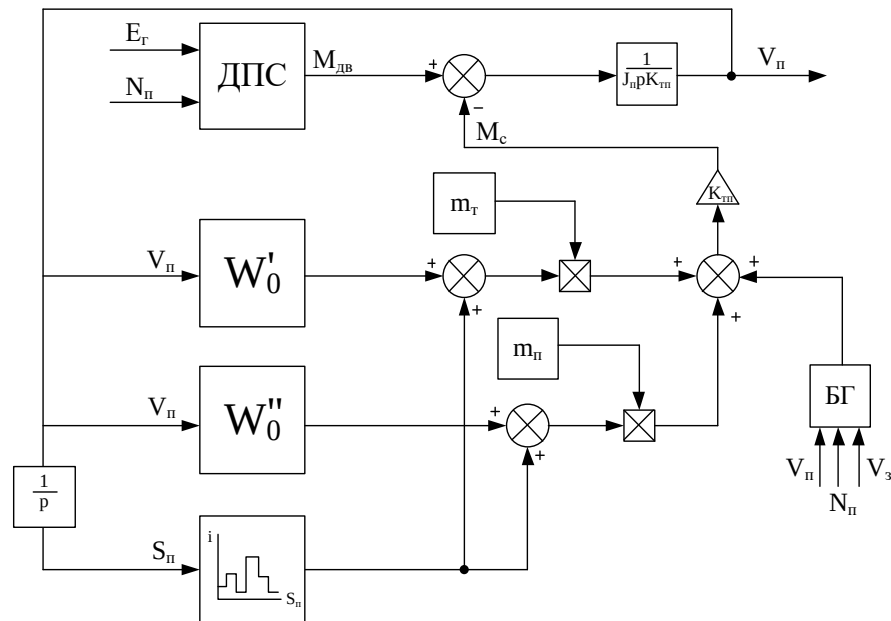


Рисунок 4 – Структурна схема імітаційної моделі тягового електроприводу тепловоза

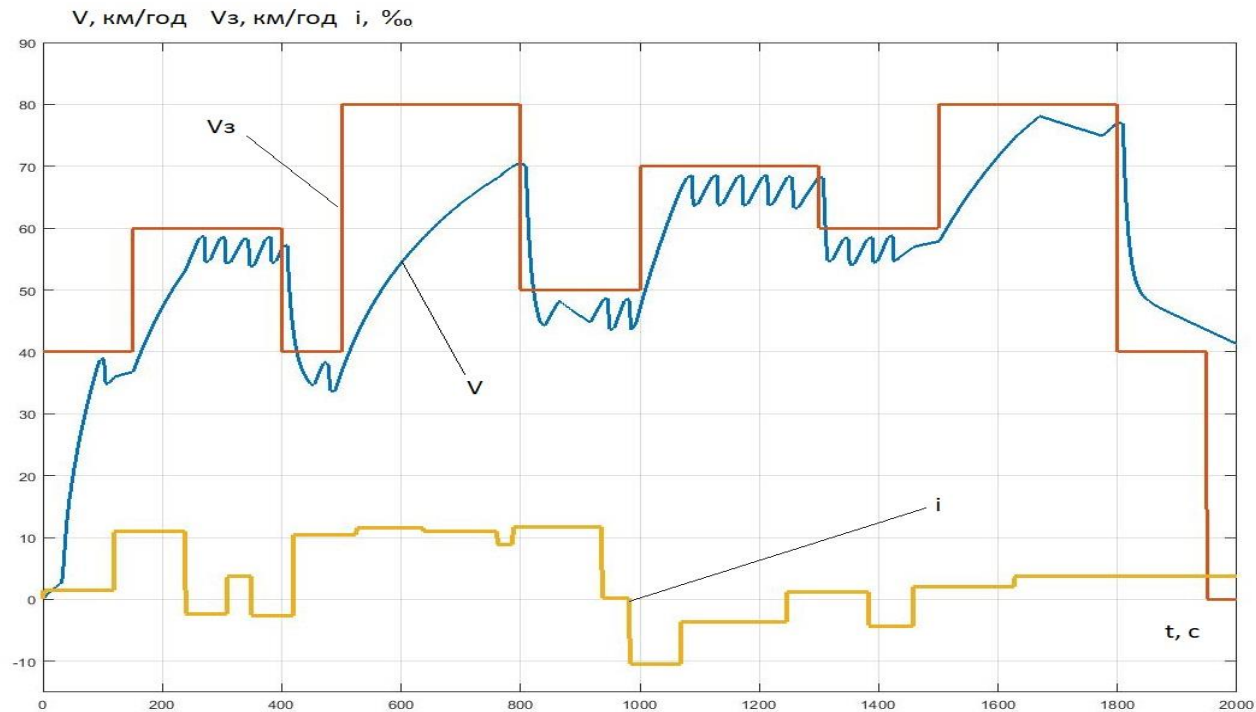


Рисунок 1 – Осцилограма роботи локомотива: задана швидкість, реальна швидкість потяга, профіль шляху

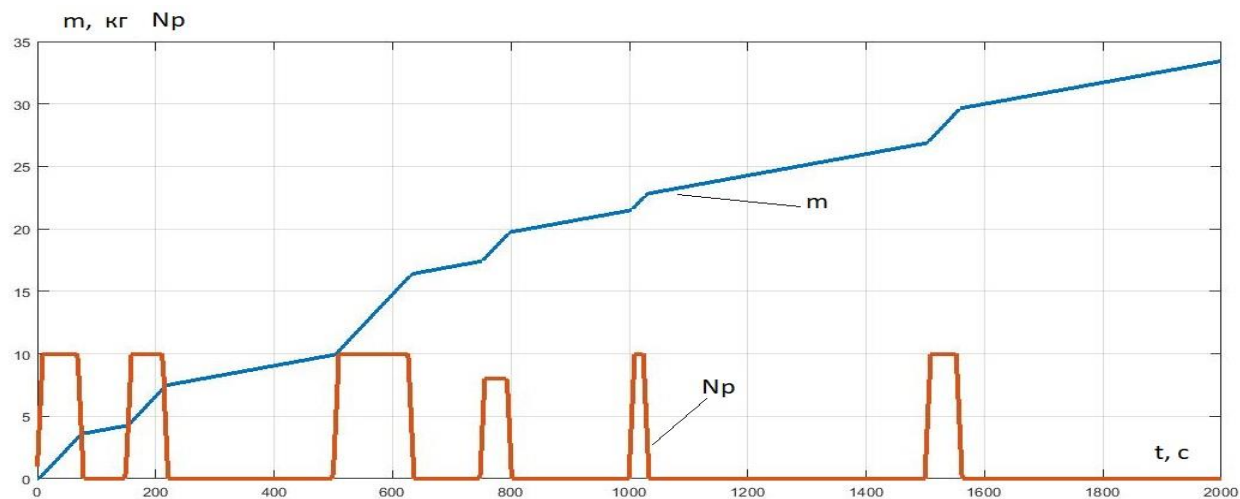
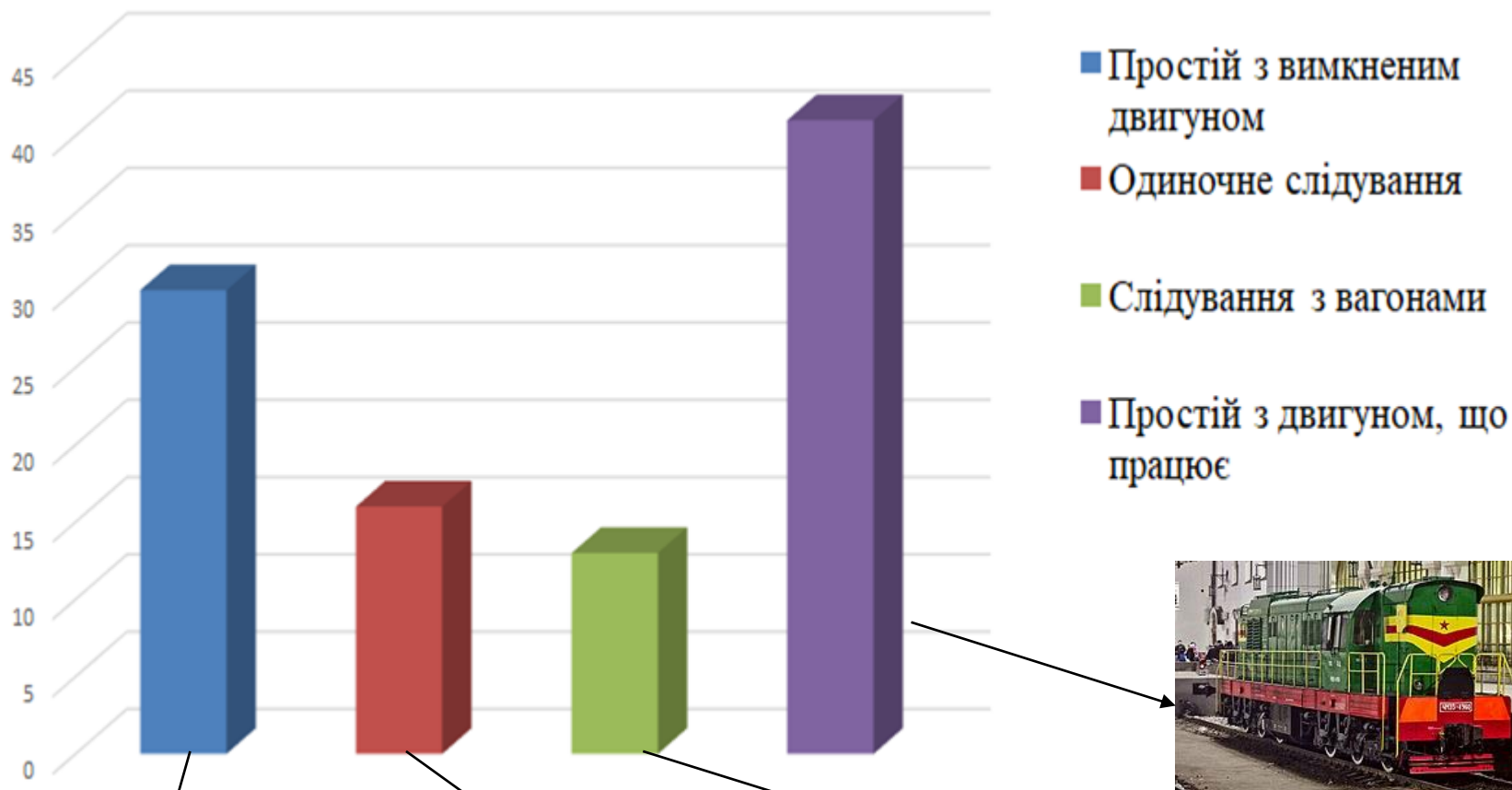


Рисунок 2 – Осцилограма позицій локомотива та розходу палива

Режими роботи маневрових тепловозів



Перспективи застосування гібридних силових установок на тепловозі ЧМЕЗ 8

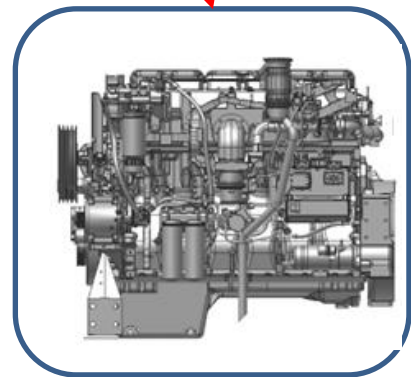
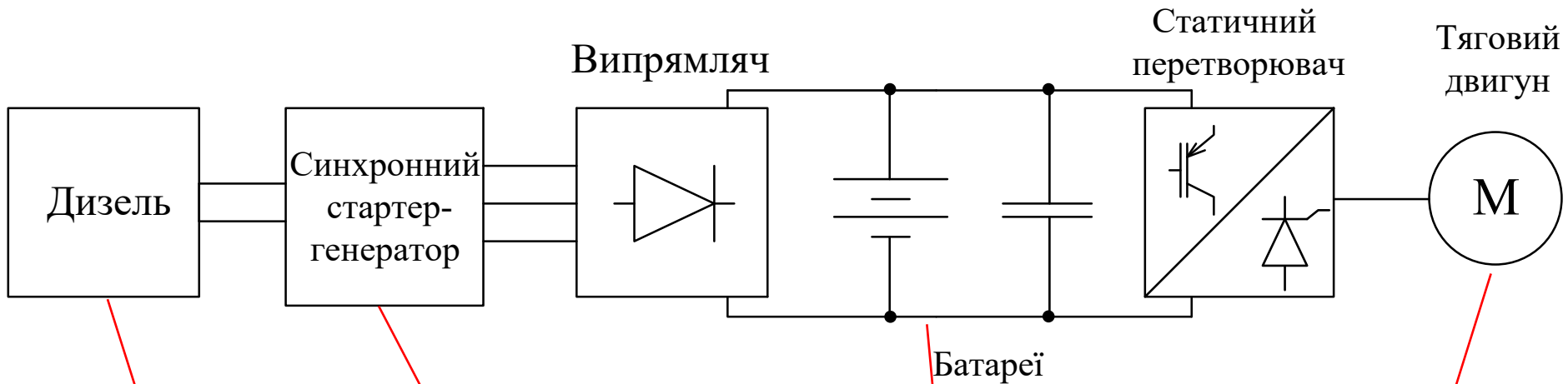


Рисунок 1 - Дизель
C18 ACERT



Рисунок 2 - Генератор
ГС-500-400



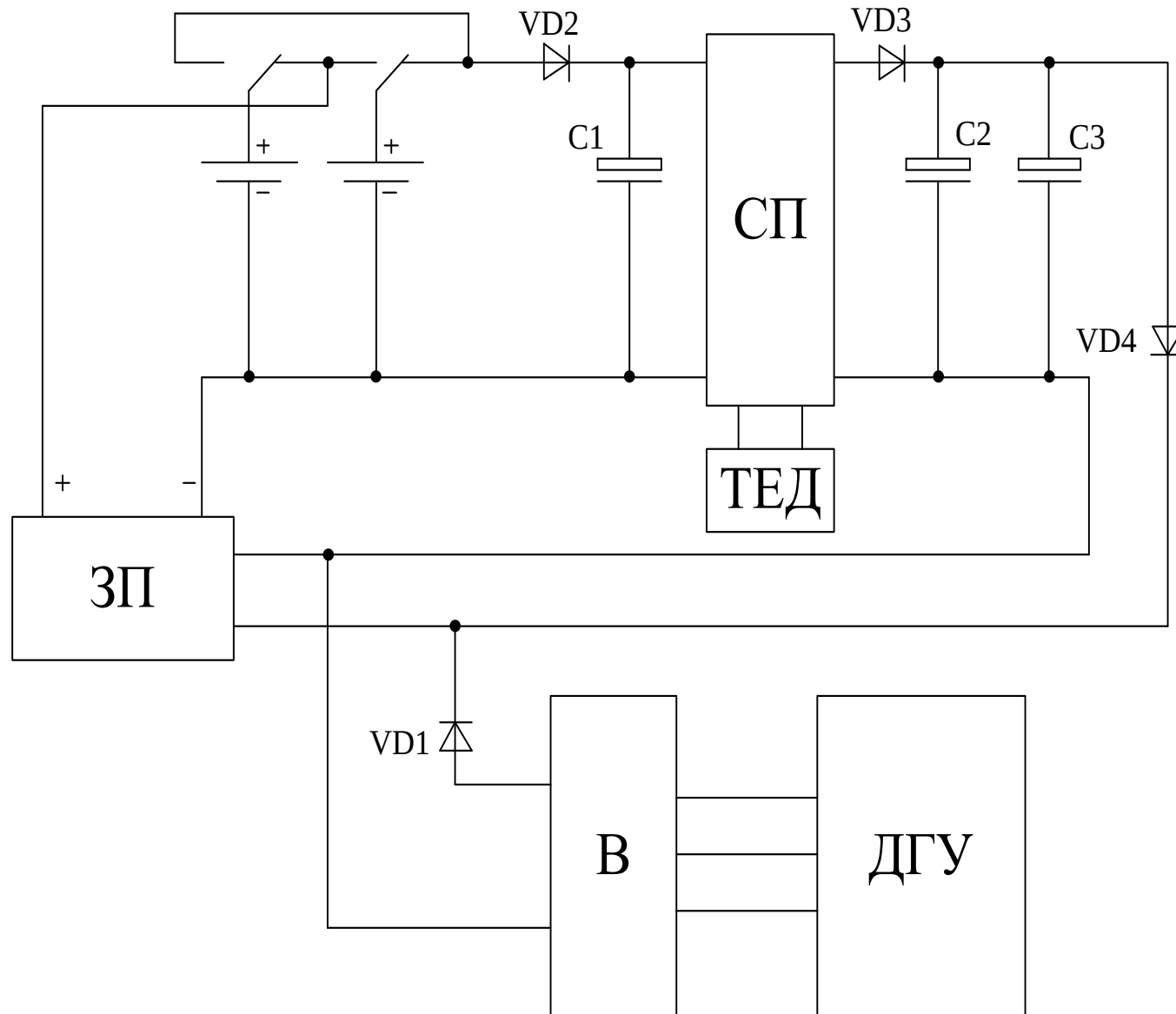
Рисунок 3 - Акумулятор LT-
LYP 240 та суперконденсаторна
батарея ІКЕ 40/96



Рисунок 4 – Тяговий
асинхронний двигун
TSA TME 42-15

Функціональна схема роботи модернізованого гібридного тепловоза

9



ДГУ – дизель-генераторна установка

В – випрямляч

ЗП – зарядний пристрій

СП – статичний перетворювач

ТЕД – тяговий двигун

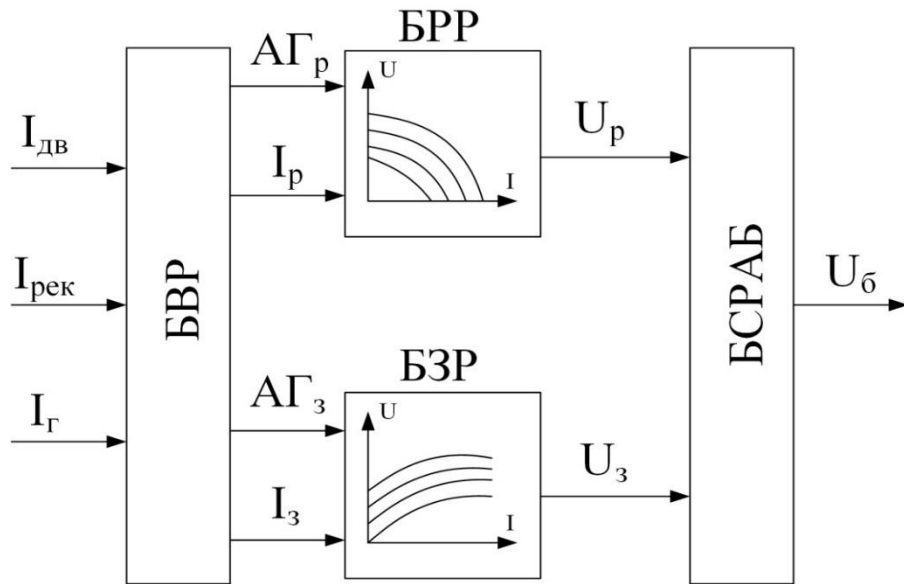


Рисунок 1 – Функціональна схема моделі акумуляторної батареї: БВР – блок вибору режиму роботи батареї, БЗР – блок, що реалізує режим заряду, БРР – блок, що реалізує режим розряду, БСРАБ – блок синхронізації режимів роботи АБ

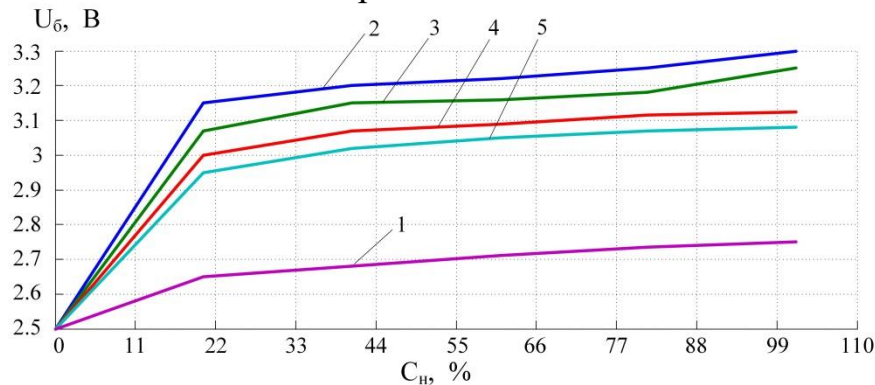


Рисунок 2 – Розрядні характеристики акумулятора LT-LYP 770

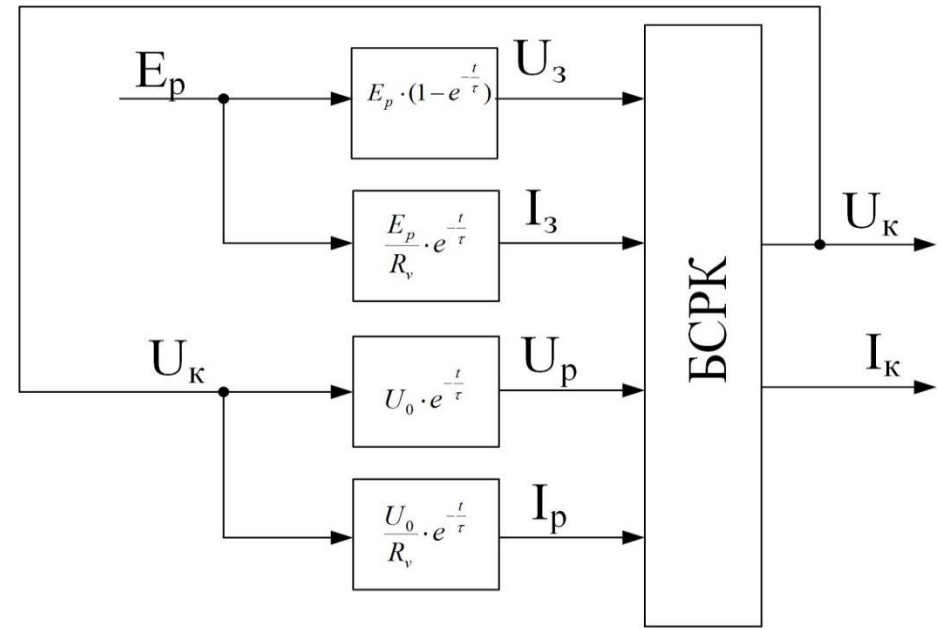


Рисунок 4 – Функціональна схема моделі іоністора: БСРК – блок синхронізації режимів роботи конденсаторної батареї

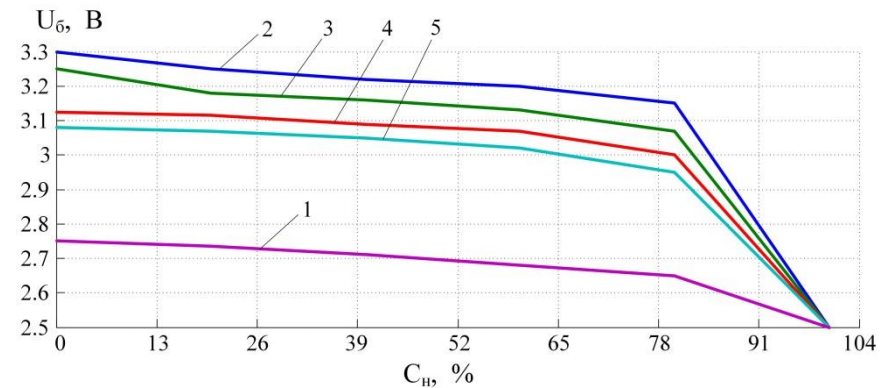


Рисунок 3 – Зарядні характеристики акумулятора LT-LYP 770

Моделювання прямого пуску асинхронного двигуна ТМЕ 42-15 11

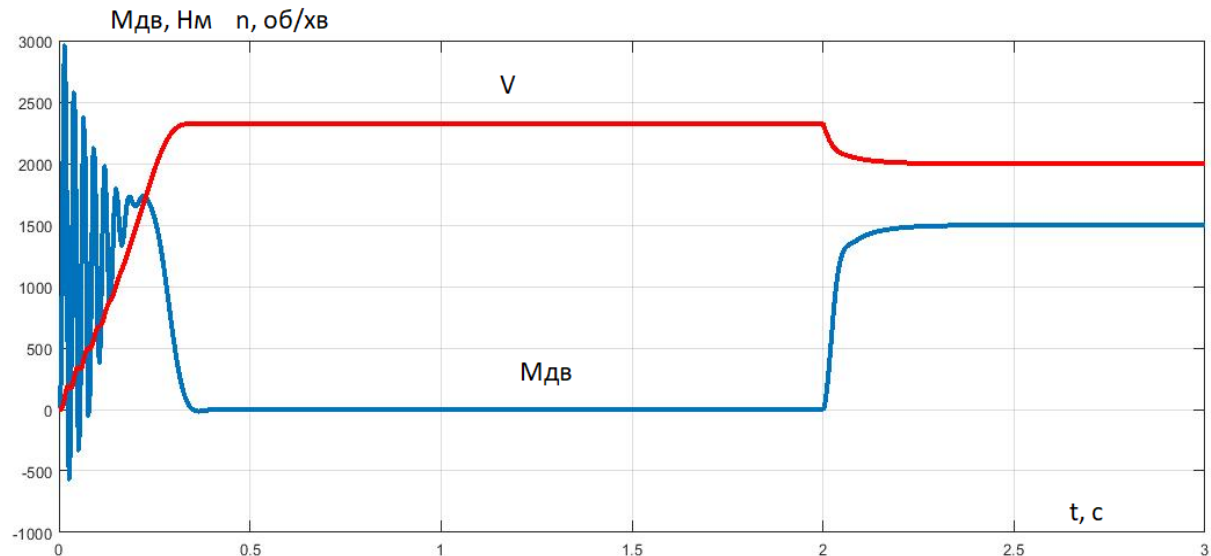


Рис. 1 – Електромагнітний момент та швидкість обертання АД

Потужність $P_{ном}$, кВт	600
Лінійна напруга U_n , В	2340
Фазний струм $I_{ф}$, А	142
Номинальна швидкість n , об/хв	2336
ККД, %	95,6
Номинальний момент M , Н·м	2919

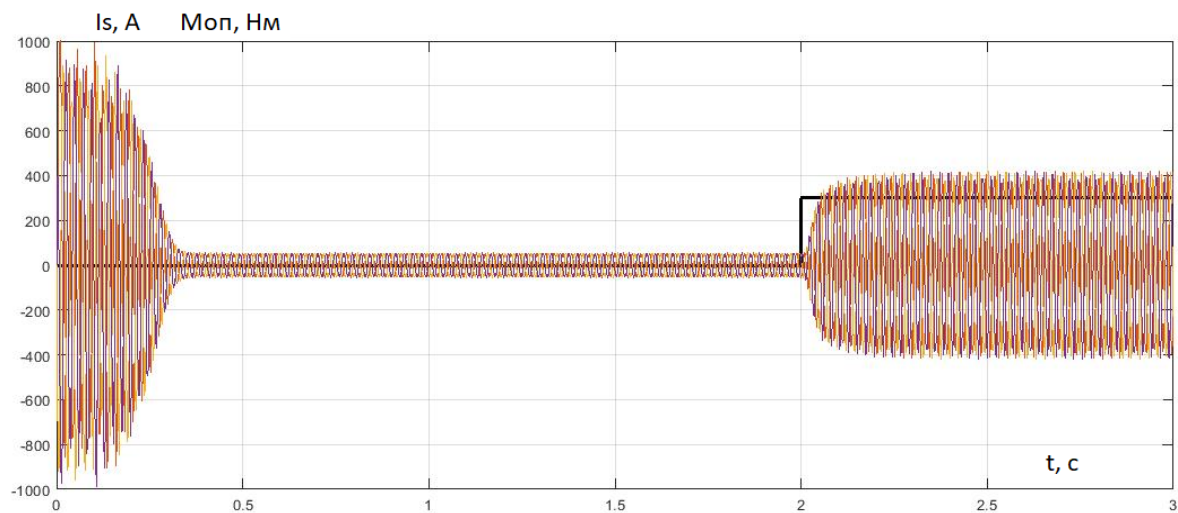


Рис. 2 – Струм статора АД

Математичне моделювання асинхронного двигуна з векторним керуванням¹²

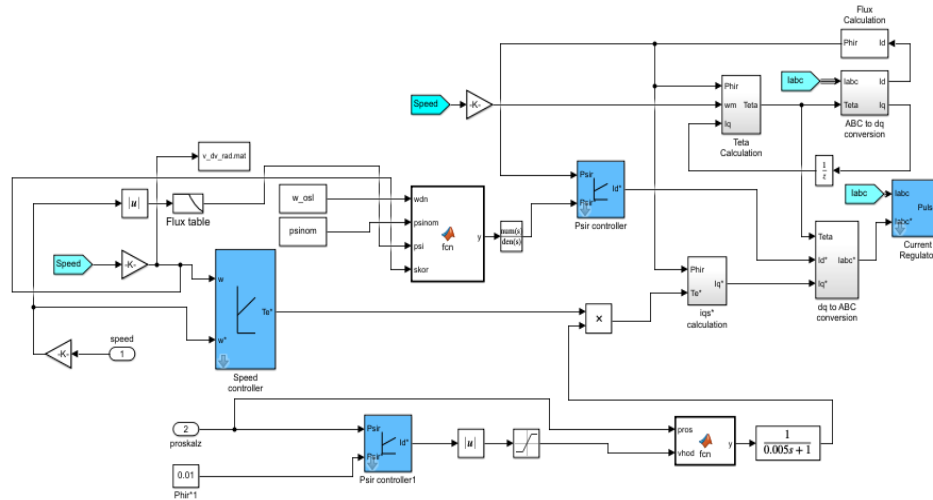


Рис. 1 – Імітаційна модель векторної системи керування

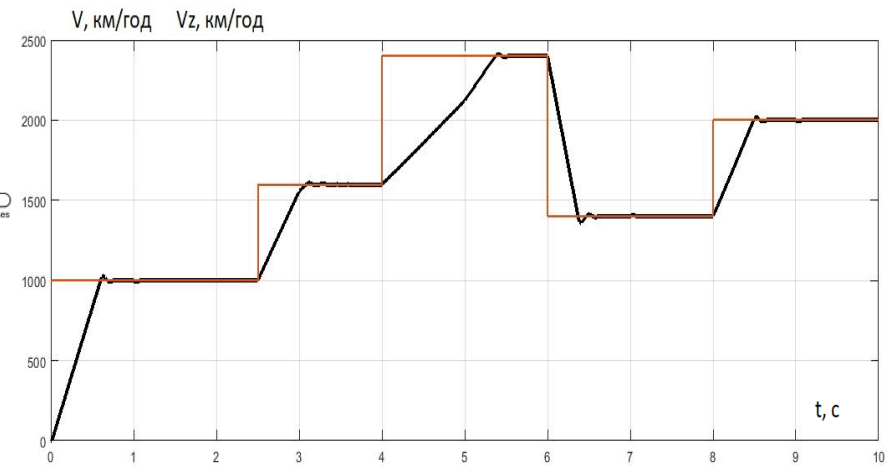


Рис. 2 – Характеристики заданої та фактичної швидкостей обертання АД

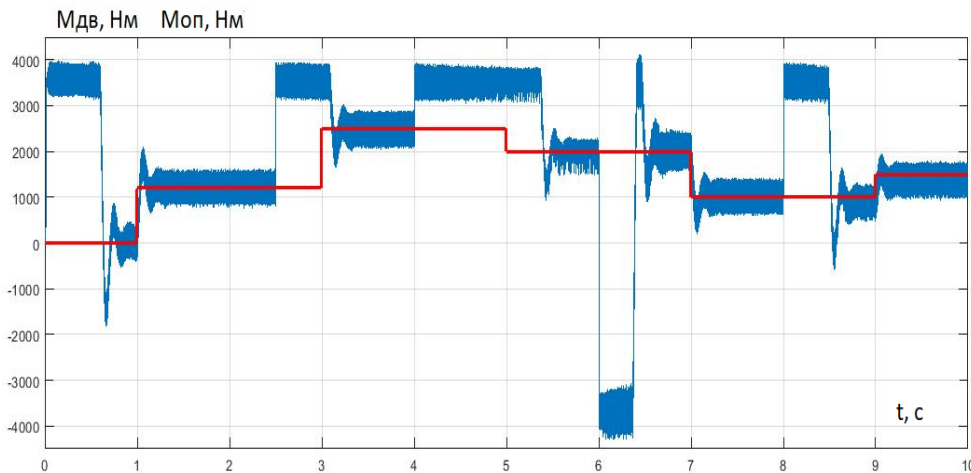


Рис. 3 – Характеристики електромагнітного моменту АД та заданого моменту опору

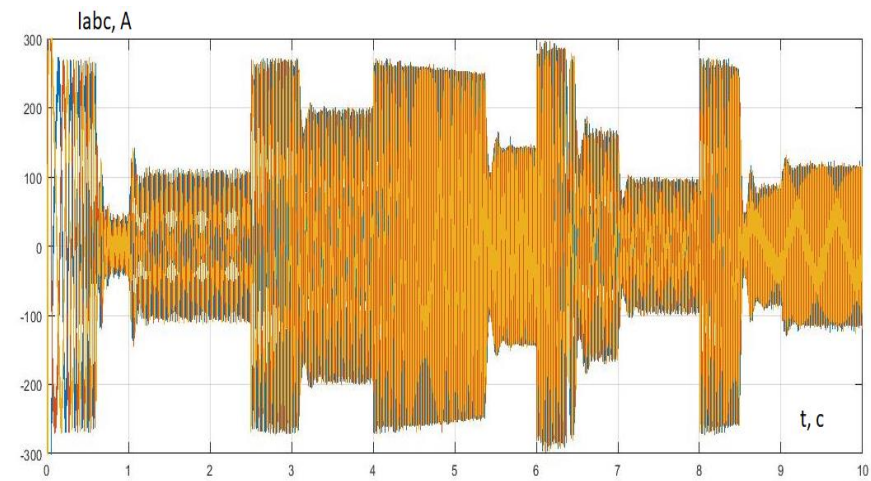
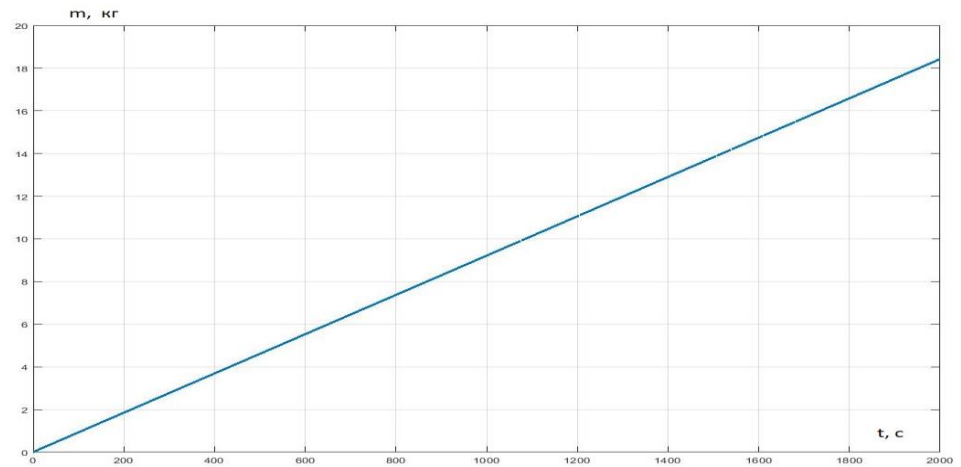
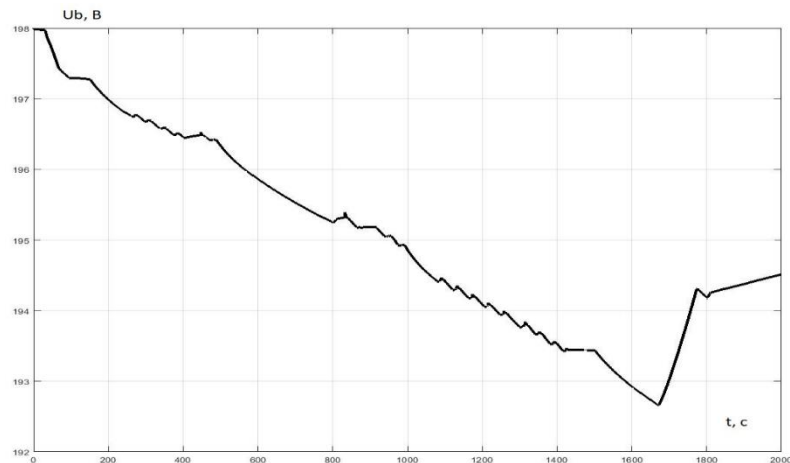
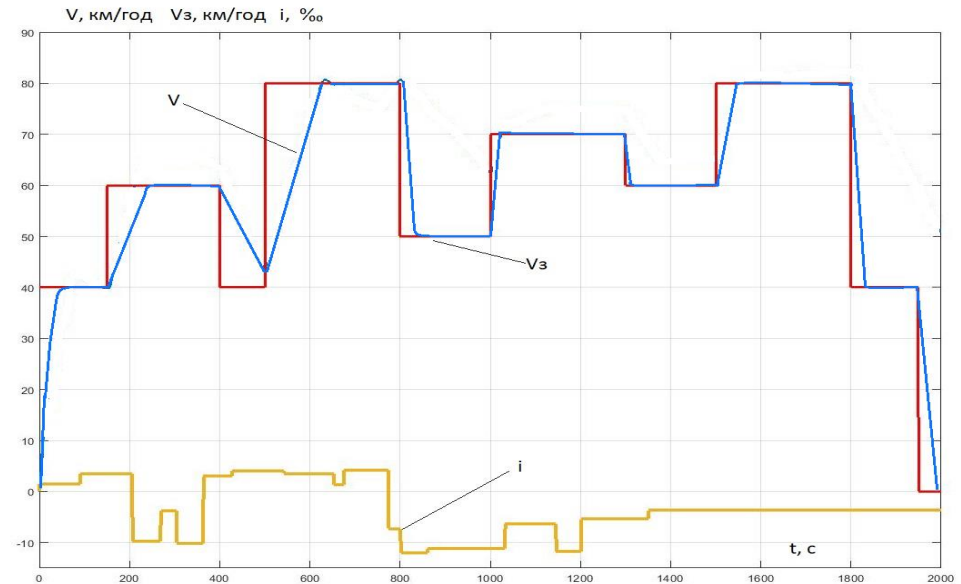
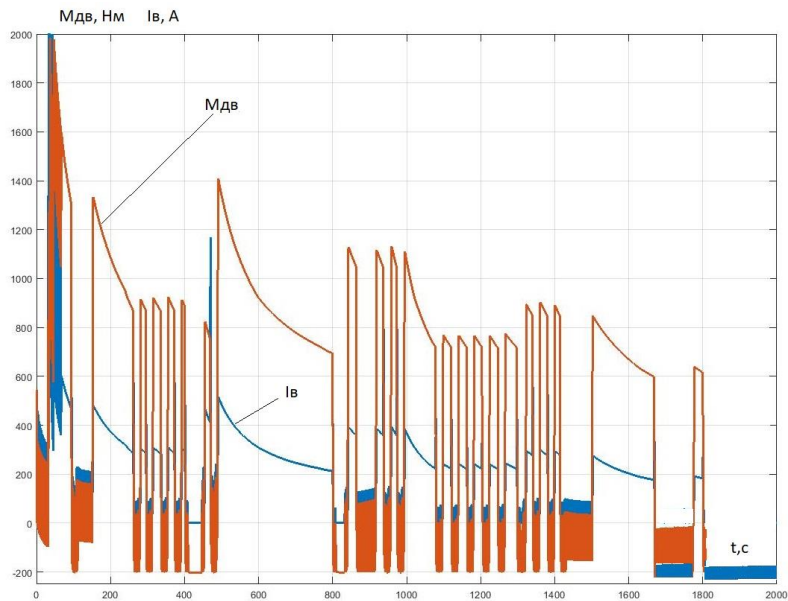


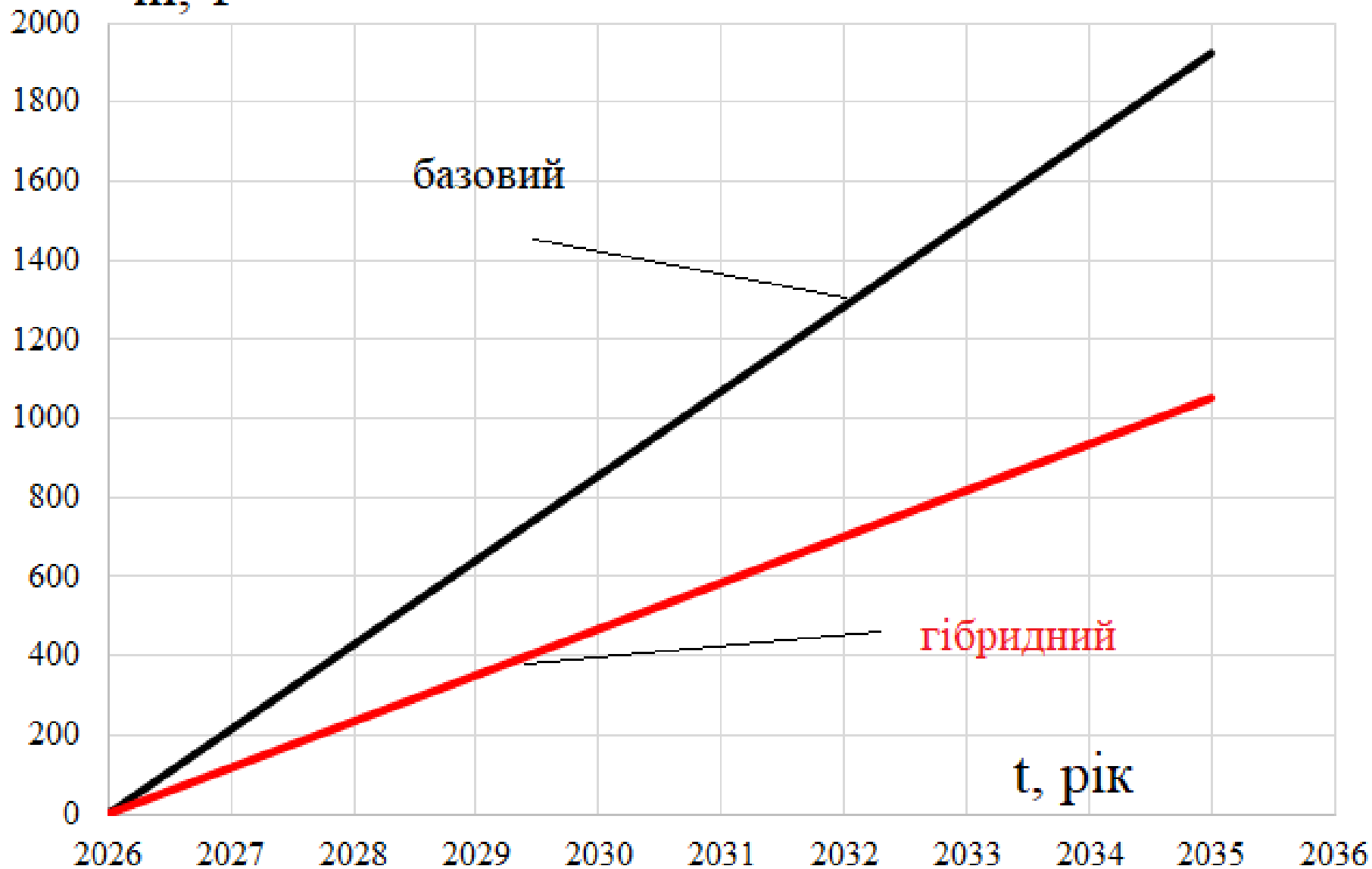
Рис. 4 - Характеристики струму статора АД



V_z – задана швидкість потяга; V – реальна швидкість потяга; i – профіль шляху; m – витрати палива; $I_{б}$ – струм акумуляторної батареї; $M_{дв}$ – момент тягового двигуна; $U_{б}$ – напруга акумуляторної батареї

Витрати пального на роботу локомотива за роками 14

m, T



- У роботі було проведене дослідження тягової електричної передачі тепловоза ЧМЕЗ для аналізу можливості його подальшої модернізації;
- Запропонований варіант модернізації із встановленням гібридної силової установки з використанням накопичувачів енергії;
- Розроблені імітаційні моделі роботи тепловозу ЧМЕЗ з базовою та гібридною системами та був проведений порівняльний аналіз їх роботи;
- Був розрахований економічний ефект від запропонованої модернізації тепловоза. За життєвий цикл обладнання у 10 років економічний ефект складе 18287,8 тис.грн.