

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Розробка енергоефективних та високонадійних електромеханічних
транспортних комплексів з оцінюванням сучасного стану технологій у
галузі залізничного транспорту та пропозиціями щодо проектування та
модернізації тягових систем**

Виконав: студент групи ЗЕЕМ-22

Олена АНДРЕЄВА

Керівник випускної роботи _____ д.т.н., проф. Олег СІНЧУК

Нормо контролер _____ д.т.н., проф. Олег СІНЧУК

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

АНДРЕЄВА Олена Вікторівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Розробка енергоефективних та високонадійних
електромеханічних транспортних комплексів з оцінюванням сучасного стану
технологій у галузі залізничного транспорту та пропозиціями щодо
проектування та модернізації тягових систем

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є розробка енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів. Завданням є оцінювання сучасного стану технологій у галузі залізничного транспорту та пропозиціями щодо проектування та модернізації тягових систем
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Характеристика енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів з оцінюванням сучасного стану технологій у галузі залізничного транспорту; II. Теоретичне обґрунтування розробки енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів у галузі залізничного; III. Пропозиції щодо проектування та модернізації тягових систем у галузі залізничного транспорту з розробкою енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів у відповідності до оцінювання сучасного стану технологій; IV. Практична реалізація енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів у відповідності до оцінювання сучасного стану технологій у галузі залізничного транспорту та пропозиціями щодо проектування та модернізації тягових систем.

4. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олег СІНЧУК		
II	Олег СІНЧУК		
III	Олег СІНЧУК		
IV	Олег СІНЧУК		

5. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Характеристика енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів	21.05.26
2	Оцінювання сучасного стану технологій у галузі залізничного транспорту	27.05.26
3	Теоретичне обґрунтування розробки енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів у галузі залізничного	31.05.26
4	Пропозиції щодо проектування та модернізації тягових систем у галузі залізничного транспорту з розробкою енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів у	07.06.26
5	Практична реалізація енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів	14.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Олена АНДРЕЄВА
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Розробка енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів з оцінюванням сучасного стану технологій у галузі залізничного транспорту та пропозиціями щодо проектування та модернізації тягових систем»

44 с., 17 рис., 27 літературних джерел

Мета роботи: Підвищення енергетичної ефективності, експлуатаційної надійності та екологічності залізничного транспорту шляхом комплексного аналізу сучасного стану світових тягових технологій та розробки науково обґрунтованих рішень для проектування нових і модернізації існуючих електромеханічних систем рухомого складу, а також комплексне розв'язання науково-технічної проблеми підвищення енергетичної ефективності та експлуатаційної надійності тягового рухомого складу залізниць шляхом впровадження інноваційних електромеханічних рішень, оптимізації топологій силових перетворювачів та розробки стратегій глибокої модернізації існуючих систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Здійснити критичний аудит сучасного стану тягового рухомого складу (ТРС), порівнявши ефективність традиційних систем (на базі двигунів постійного струму та асинхронних машин) із новітніми розробками.

Провести критичний аналіз сучасного стану та світових тенденцій розвитку тягових систем залізничного транспорту (перехід на синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM), використання карбід-кремнієвих (SiC) напівпровідників).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

Дослідити баланс втрат енергії в системі "тягова підстанція — контактна мережа — рухомий склад" на основі рівняння руху поїзда та тягових розрахунків.

Розробити критерії та метрики для оцінки енергоефективності транспортних комплексів з урахуванням повного життєвого циклу (LCC - Life Cycle Cost) обладнання.

Розробити концептуальні пропозиції щодо впровадження бортових систем накопичення енергії (Energy Storage Systems) для максимального використання енергії рекуперативного гальмування.

Сформувати концептуальні пропозиції щодо модернізації застарілого парку локомотивів (заміна колекторних тягових двигунів на безколекторні, впровадження систем бортового накопичення енергії на базі суперконденсаторів).

Запропонувати критерії оптимізації топології тягового перетворювача та алгоритмів керування синхронними двигунами з постійними магнітами (СДПМ) для застосування у магістральному та моторвагонному рухомому складі.

Спроекувати відмовостійкі топології тягових інверторів із резервуванням фазних модулів для забезпечення руху поїзда навіть у разі часткової відмови силової електроніки.

Оцінити надійність запропонованих електромеханічних комплексів за міжнародними стандартами RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) та розрахувати показники вартості життєвого циклу (LCC).

Запропонувати алгоритми інтелектуального керування енергоспоживанням (Smart Energy Management) для оптимізації режимів тяги та максимізації віддачі від рекуперативного гальмування.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ТЯГОВА СИСТЕМА,
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ КОМПЛЕКС, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

НАДІЙНІСТЬ, RAMS, РЕКУПЕРАЦІЯ ЕНЕРГІЇ, МОДЕРНІЗАЦІЯ, ТЯГОВА СИСТЕМА, СИЛОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	9
Розділ 1. Характеристика енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів з оцінюванням сучасного стану технологій у галузі залізничного транспорту.....	15
Розділ 2. Теоретичне обґрунтування розробки енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів у галузі залізничного.....	17
Розділ 3. Пропозиції щодо проектування та модернізації тягових систем у галузі залізничного транспорту з розробкою енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів у відповідності до оцінювання сучасного стану технологій	22
Розділ 4. Практична реалізація енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів у відповідності до оцінювання сучасного стану технологій у галузі залізничного транспорту та пропозиціями щодо проектування та модернізації тягових систем	26
Висновки	31
Список використаних джерел	33
Додаток А.....	36
Додаток Б	37
Додаток В.....	38
Додаток Г	39
Додаток Д.....	40
Додаток Е	41
Додаток Ж	42
Додаток З.....	43

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Сучасний стан технологій у галузі залізничного транспорту

Залізничний транспорт залишається одним із найбільш екологічних та масових видів сполучення.

Проте виклики сучасного світу — зростання вартості електроенергії, жорсткі екологічні стандарти щодо викидів вуглецю та вимоги до підвищення швидкості і маси поїздів — диктують необхідність радикального перегляду підходів до проектування тягових систем.

Сьогодні глобальний ринок залізничних технологій переживає зміну технологічних укладів.

Базовим стандартом став асинхронний тяговий привід з мікропроцесорним векторним керуванням.

Водночас передовим краєм науки є впровадження тягових синхронних двигунів з постійними магнітами (PMSM), які мають на 3-5% вищий ККД порівняно з асинхронними аналогами та значно менші масогабаритні показники.

Іншим революційним напрямком є перехід від традиційних кремнієвих (Si) IGBT-транзисторів до напівпровідників на основі карбіду кремнію (SiC). Використання SiC-модулів дозволяє знизити комутаційні втрати в інверторі на 50-70% і суттєво спростити систему охолодження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняльний аналіз тягових систем

Для розуміння вектора модернізації доцільно порівняти характеристики різних поколінь тягових комплексів:

Характеристика	Традиційна система (Колекторна)	Сучасна система (Асинхронна)	Перспективна система (PMSM + SiC)
Тип двигуна	Постійного струму	Асинхронний з КЗ ротором	Синхронний з постійними магнітами
Силова електроніка	РКС або тиристорні перетворювачі	IGBT інвертори (Si)	SiC інвертори високої частоти
Енергоефективність	Низька (великі втрати на нагрів)	Висока (ККД ~90-92%)	Максимальна (ККД ~95-97%)
Обслуговування	Високі витрати (заміна щіток)	Мінімальні витрати	Практично не потребує
Рекуперація	Обмежена (часто лише на реостати)	Повна в контактну мережу	З накопиченням у бортових ESS

Проблематика модернізації та надійності

Незважаючи на наявність передових рішень, більшість залізничних операторів експлуатують значну кількість локомотивів попередніх поколінь, фізичний та моральний знос яких наближається до критичної межі.

Закупівля виключно нового рухомого складу вимагає колосальних капіталовкладень.

Тому розробка науково обґрунтованих пропозицій щодо глибокої модернізації (ремоторизації) існуючих машин є надзвичайно актуальною.

Модернізація передбачає не просто заміну зношених деталей, а інтеграцію нових електромеханічних комплексів у старі екіпажні частини.

Це вимагає вирішення складних інженерних задач із забезпечення сумісності нового мікропроцесорного обладнання із застарілими системами безпеки, а також розрахунку нових динамічних навантажень на колісні пари.

Ключовою вимогою до нових та модернізованих систем є безпрецедентна **надійність**.

В умовах щільного графіка руху зупинка поїзда через відмову електроніки є недопустимою.

Це зумовлює необхідність проектування відмовостійких (fault-tolerant) систем: використання багатофазних (наприклад, шестифазних) тягових двигунів та модульних інверторів, де вихід з ладу одного транзистора або фази не призводить до зупинки локомотива, а лише пропорційно знижує його тягову потужність.

Практичне значення пропозицій

Реалізація запропонованих підходів до проектування дозволить створити транспортні комплекси, здатні заощаджувати до 20-30%

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

електроенергії (завдяки високому ККД та оптимізованій рекуперації), подовжити міжремонтні інтервали рухомого складу в 2-3 рази та забезпечити найвищий рівень експлуатаційної готовності залізничного транспорту.

Стратегічна роль залізниць та виклики сьогодення

У контексті глобального переходу до сталого розвитку (Sustainable Development) та жорсткої політики декарбонізації (Green Deal), електрифікований залізничний транспорт визнано найбільш екологічним та ефективним засобом масових пасажирських і вантажних перевезень.

Проте вітчизняна залізнична галузь стикається з критичним рівнем фізичного та морального зносу тягового рухомого складу.

Більшість локомотивів, що експлуатуються, побудовані за технологіями 70-80-х років минулого століття, використовують колекторні тягові двигуни постійного струму та реостатні системи регулювання.

Це призводить до колосальних втрат електроенергії, високих витрат на технічне обслуговування та низьких показників готовності парку.

Еволюція тягових технологій

Сучасний стан технологій у світовій галузі залізничного транспорту характеризується повним переходом до тягових приводів змінного струму.

Впровадження асинхронних тягових двигунів (АТД) у поєднанні з транзисторними інверторами напруги (IGBT/SiC) дозволило значно підвищити питому потужність та надійність локомотивів.

Однак технічний прогрес не стоїть на місці.

Наразі світові лідери транспортного машинобудування (Siemens, Alstom, CRRC) активно впроваджують у тягові системи магістральних електровозів та швидкісних поїздів **синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ)**.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняно з АТД, застосування СДПМ дозволяє зменшити масу двигуна на 20-30%, усунути електричні втрати в роторі та підвищити загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) приводу на 3-5%, особливо в режимах часткових навантажень, які є переважаючими для залізничного транспорту.

Проблема енергетичної ефективності та рекуперації

Одним із ключових резервів підвищення енергоефективності є оптимізація витрат енергії на тягу поїздів. Базове рівняння руху поїзда має простий вигляд.

Значна частина енергії, витраченої на подолання інерції маси під час розгону, може бути повернута в мережу при рекуперативному гальмуванні.

Проте в існуючих мережах постійного струму часто виникає ситуація, коли енергію рекуперації нікуди віддавати (відсутність іншого поїзда на ділянці в режимі тяги).

Як наслідок, напруга в контактній мережі зростає, і енергія марно розсіюється на гальмівних реостатах локомотива.

Шляхи модернізації та проєктування нових комплексів

Для подолання цих проблем у роботі пропонується комплексний підхід до проєктування:

1. **Гібридизація рухомого складу.** Впровадження на борту електровоза систем накопичення енергії (Energy Storage Systems - ESS) на базі суперконденсаторів (для поглинання пікових потужностей гальмування) та літій-титанатних акумуляторних батарей. Це не лише вирішує проблему приймання енергії рекуперації, але й забезпечує автономний хід локомотива на неелектрифікованих ділянках (наприклад, у портах чи на сортувальних станціях).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

2. Застосування напівпровідників на основі карбіду кремнію (SiC).

Перехід від традиційних кремнієвих IGBT-модулів до SiC-технологій у тягових перетворювачах дозволяє підвищити частоту комутації, значно зменшити масо-габаритні показники систем охолодження та вхідних фільтрів, а також додатково знизити комутаційні втрати.

3. Інтелектуальне керування. Впровадження систем предиктивного керування енергоспоживанням (допомога машиністу / автомашніст), що враховують профіль колії, розклад руху та стан контактної мережі в реальному часі для вибору оптимальної енергоефективної траєкторії руху.

Наукова та практична значущість

Актуальність розробки таких електромеханічних комплексів обумовлена необхідністю докорінного оновлення транспортної інфраструктури.

Пропоновані заходи з модернізації тягових систем дозволять скоротити питомі витрати електроенергії на тягу поїздів на **15-25%**, істотно підвищити надійність за рахунок зменшення кількості механічних вузлів (перехід до безредукторного приводу) та забезпечити відповідність рухомого складу жорстким європейським стандартам безпеки.

Інвестування в наукомісткі енергоефективні технології є безальтернативним шляхом до підвищення конкурентоспроможності залізничних перевезень.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Розділ 1. Характеристика енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів з оцінюванням сучасного стану технологій у галузі залізничного транспорту

Колекторний двигун був шедевром електротяги з початку до кінця ХХ століття. Він може житись від однофазної контактної мережі, а робоча точка регулюється трансформатором, який подає напругу на обмотку.

Намагнічування, як правило, виконується послідовно з якорем.

Це двигун постійного струму, який живиться безпосередньо синусоїдальною напругою, звідси і назва двигуна прямого струму.

Для такої синусоїдальної напруги потрібне спеціальне обладнання, розроблене Бен-Ешенбургом близько 1905 року.

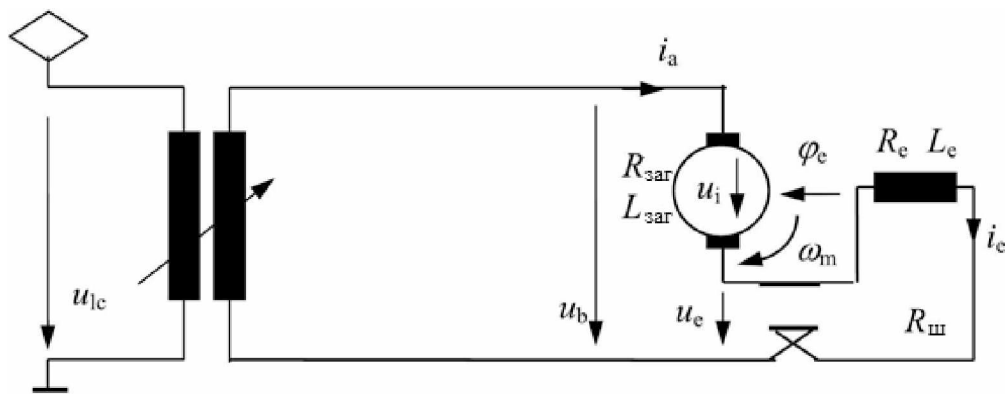


Рис. 1 Послідовний двигун у тяговому режимі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1			Лім.	Лист	Листів	
Розробив	Андрєєва О.В.									15	2
Перевірив	Сінчук О.М.										
Реценз.								КНУ ЗЕЕМ-22			
Н. Контр.	Сінчук О.М.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

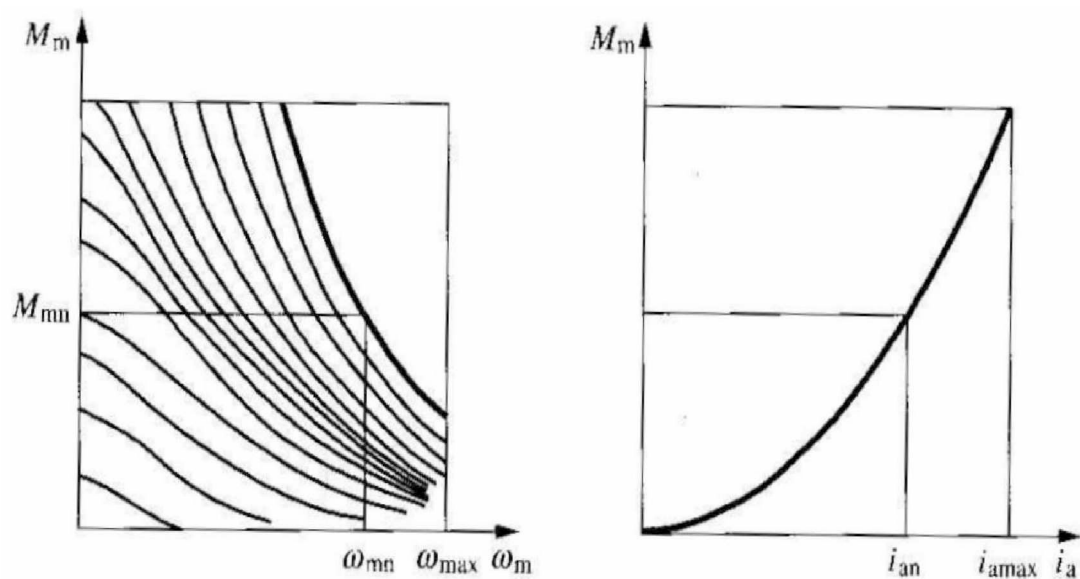


Рис. 2 Характеристики крутного моменту в залежності від струму та швидкості.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01

Арк.

16

Розділ 2. Теоретичне обґрунтування розробки енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів у галузі залізничного

У розділі 1 не згадувалася комутаційна обмотка, що дозволяє компенсувати комутаційну напругу u_k , що виникає між двома сусідніми колекторними лопатками і прискорює повернення до нуля струму у відключеній обмотці з допомогою щіток на колекторі.

На перших тягових двигунах ця обмотка була відсутня.

$$u_k = L_\sigma \frac{di_a}{dt} \quad (1)$$

На однофазних двигунах виникає напруга трансформації u_{tm} .

$$u_{tm} = 4,44 \phi_c f_{lc} N \quad (2)$$

Для компенсації цих напруг паралельно обмотці комутації включається омичний шунт R_c .

Компенсаційна обмотка $L_{\text{комп}}$ частково компенсує падіння індуктивної напруги двигуна.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат			
Розробив		Андрєєва О.В.			Розділ 2	Літ.	Лист
Перевірів		Сінчук О.М.					17
Реценз.							5
Н. Контр.		Сінчук О.М.				КНУ ЗЕЕМ-22	
Затвердив		Пересунько І.І.					

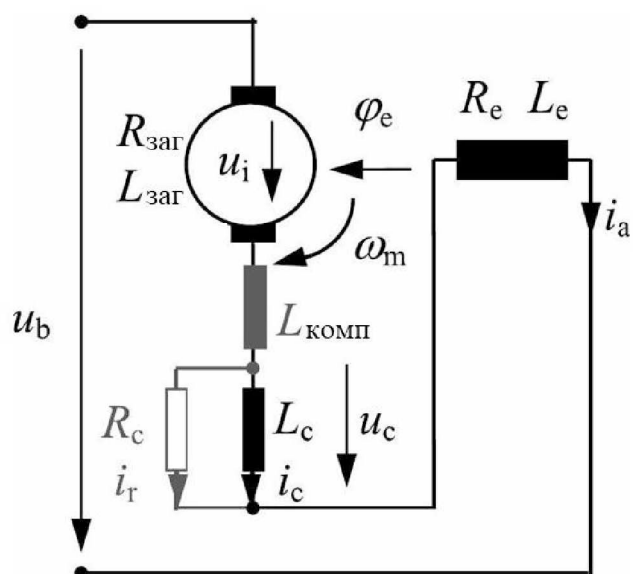


Рис. 3 Обмотки однофазного двигателя.

Векторна діаграма двигуна показує напругу u_c на комутаційній обмотці та обидві додаткові напруги u_k та $u_{заг}$: ефект омичного шунта очевидний.

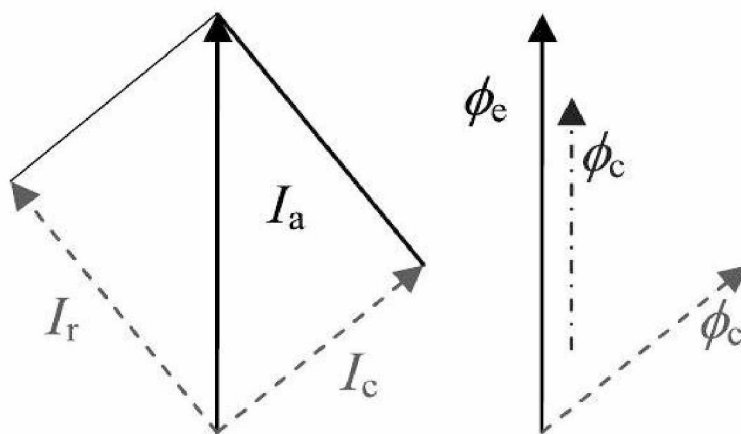


Рис. 4 Комуताція в однофазному двигуні без омичного шунту

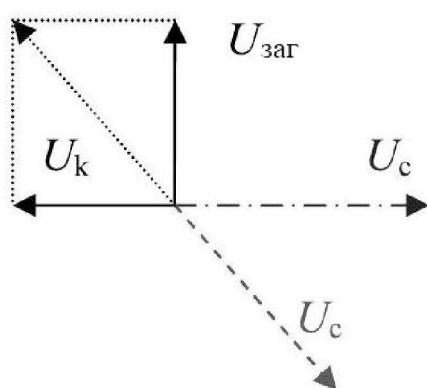


Рис. 5 Комутація в однофазному двигуні з омичним шунтом

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Без омичного шунта компенсується лише одна складова напруги колектора - $-u_k$.

Похідна струму в обмотці ротора залежить від швидкості, компенсація ефективна лише з тієї швидкості, де вироблявся розрахунок шунта; інших швидкостях залишається залишкове напруга u_f .

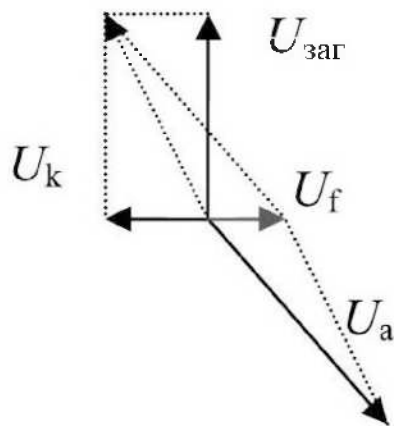


Рис. 6 Комутація в однофазному двигуні на низькій або номінальній швидкості.

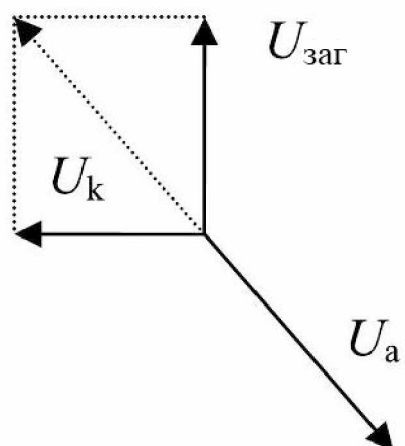


Рис. 7 Результирующий вектор комутации в однофазном двигуни на низькій або номінальній швидкості.

Розділ 3. Пропозиції щодо проектування та модернізації тягових систем у галузі залізничного транспорту з розробкою енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів у відповідності до оцінювання сучасного стану технологій

У цій роботі розглядаються не всі схеми гальмування, а лише два приклади: один у реостатному режимі та один у режимі рекуперації.

Енергія збудження може подаватися від вбудованого перетворювача.

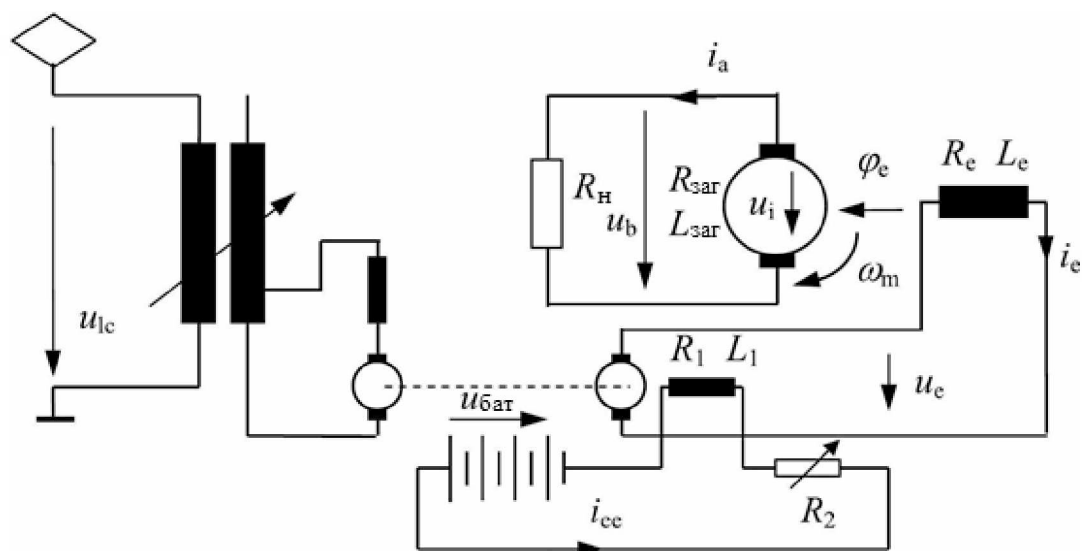


Рис. 8 Реостатне гальмування при збудженні постійним струмом: схема з генераторною групою.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 3		
Розробив	Андрєєва О.В.						
Перевірів	Сінчук О.М.				КНУ ЗЕЕМ-22		
Реценз.							
Н. Контр.	Сінчук О.М.						
Затвердив	Пересунько І.І.						
					Літ.	Лист	Листів
						22	4

Струм збудження $i_{\text{св}}$ в намагніченній машині невеликий, опір R_2 розрахований на плавну, а не ступінчасту зміну.

Один із тягових двигунів може використовуватися як генератор для живлення інших.

Схема аналогічна, але «збуджуюча машина» приводиться в рух валом.

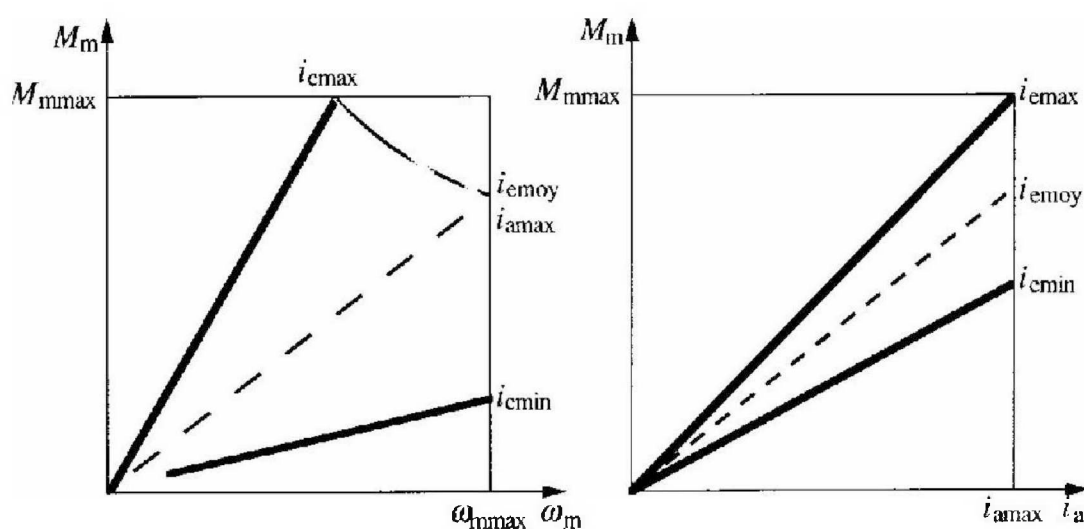
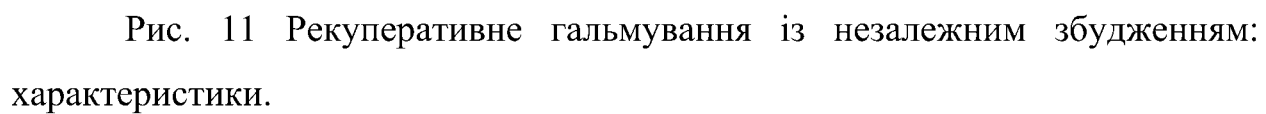
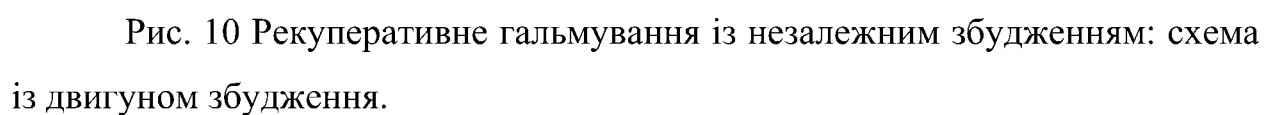


Рис. 9 Реостатне гальмування під час збудження постійним струмом: характеристики.

Замість того, щоб відводити енергію гальмування на резистор, її можна повертати в мережу живлення.

Принцип Бена-Ешенбурга зрештою реалізується за допомогою збудження одним з тягових двигунів



Коефіцієнт потужності цієї діаграми дуже низький.

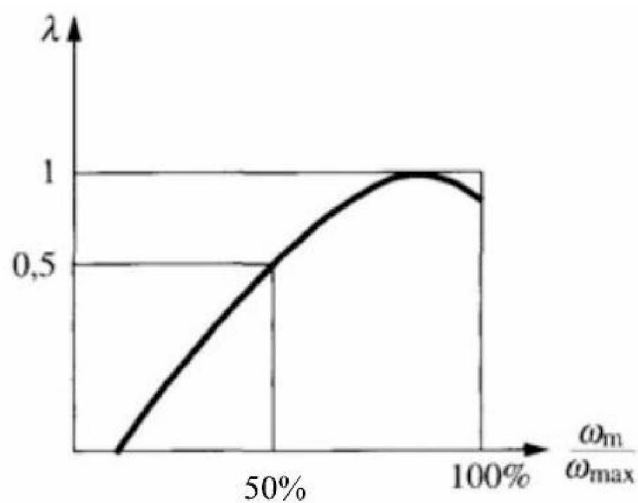


Рис. 12 Співвідношення потужностей при гальмуванні двигуном збудження.

Розділ 4. Практична реалізація енергоефективних та високонадійних електромеханічних транспортних комплексів у відповідності до оцінювання сучасного стану технологій у галузі залізничного транспорту та пропозиціями щодо проектування та модернізації тягових систем

Остання запланована серія локомотивів із прямим приводом випускалася з 1972 (CFF: Re 6/6) по 1974 роки (DB: 155).

Останні побудовані екземпляри були введені в експлуатацію в середині вісімдесятих років (CFF: Re 4/4 II та DB: 155).

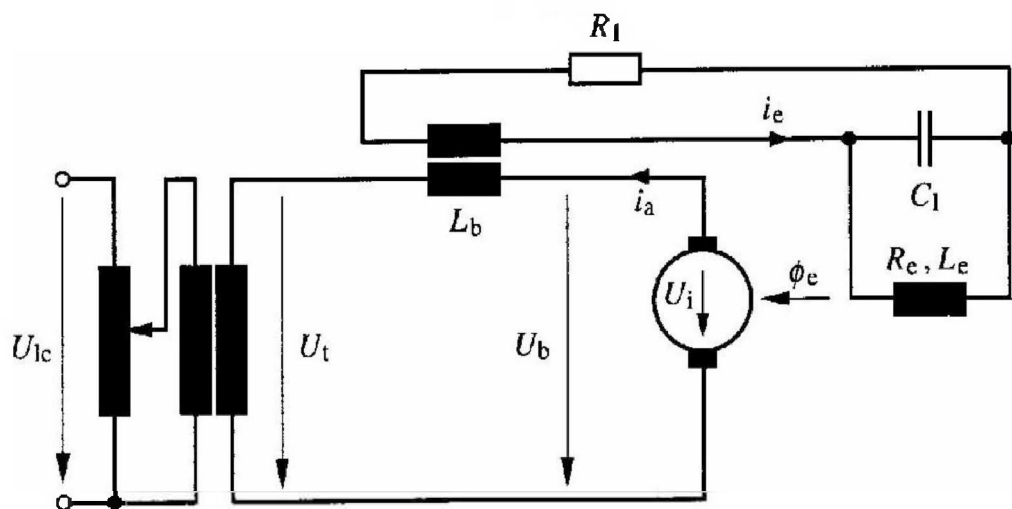


Рис. 13 Принципова схема гальмування з резонансним контуром.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01								
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 4				Літ.	Лист	Листів		
Розробив	Андрєєва О.В.											26	5
Перевірів	Сінчук О.М.												
Реценз.									КНУ ЗЕЕМ-22				
Н. Контр.	Сінчук О.М.												
Затвердив	Пересунько І.І.												

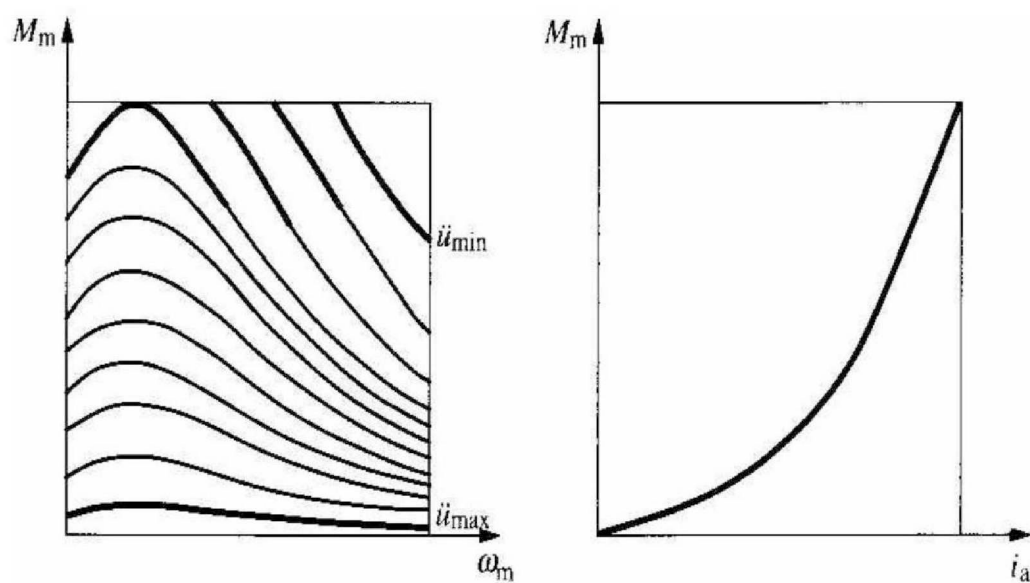


Рис. 14 Характеристики моменту під час гальмування з резонансним контуром.

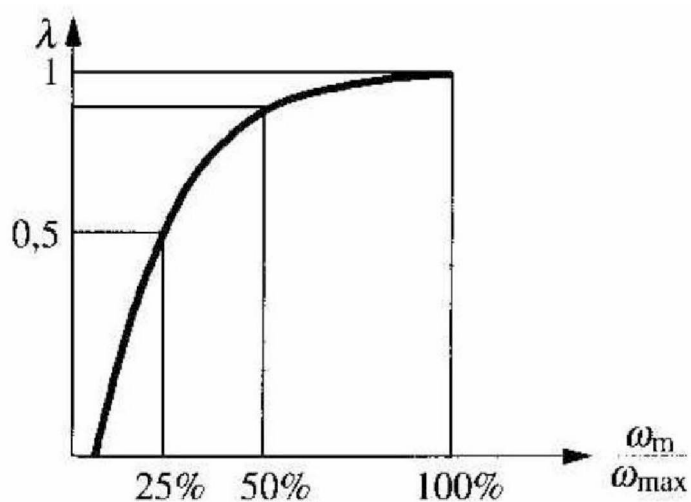


Рис. 15 Співвідношення потужностей при гальмуванні з резонансним контуром.

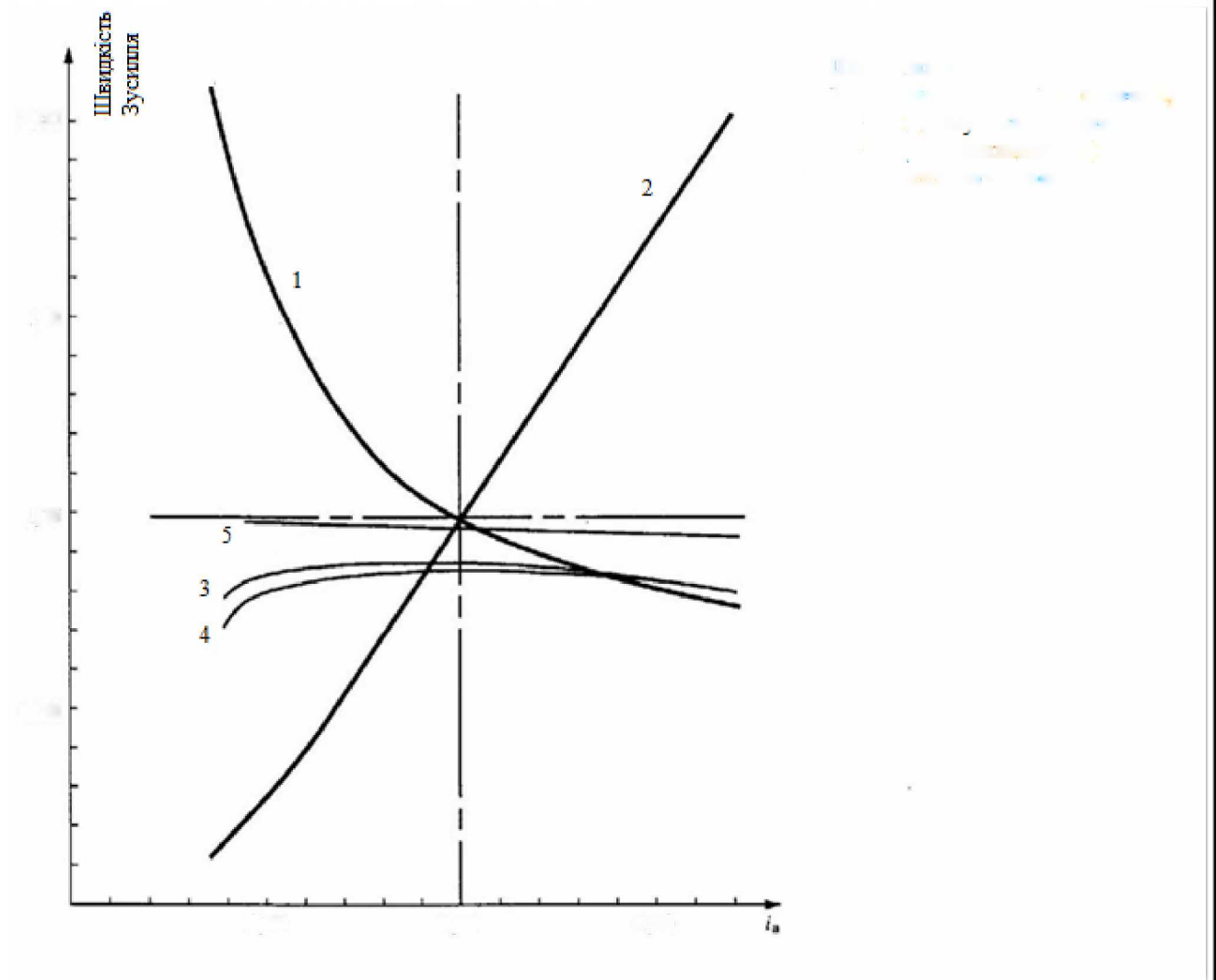


Рис. 16 Типові функції прямого двигуна на випробувальному стенді.

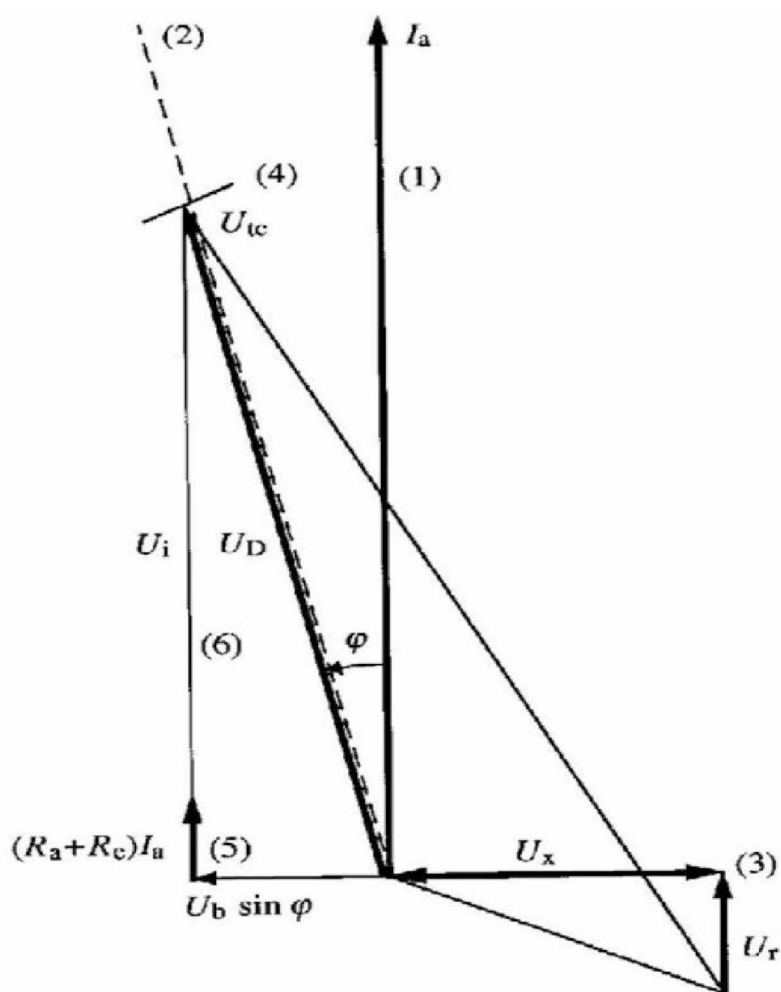


Рис. 17 Векторна діаграма двигуна в номінальній робочій точці.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01

Арк.

30

Висновки

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно було виконати такі завдання:

Здійснити критичний аудит сучасного стану тягового рухомого складу (ТРС), порівнявши ефективність традиційних систем (на базі двигунів постійного струму та асинхронних машин) із новітніми розробками.

Провести критичний аналіз сучасного стану та світових тенденцій розвитку тягових систем залізничного транспорту (перехід на синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM), використання карбід-кремнієвих (SiC) напівпровідників).

Дослідити баланс втрат енергії в системі "тягова підстанція — контактна мережа — рухомий склад" на основі рівняння руху поїзда та тягових розрахунків.

Розробити критерії та метрики для оцінки енергоефективності транспортних комплексів з урахуванням повного життєвого циклу (LCC - Life Cycle Cost) обладнання.

Розробити концептуальні пропозиції щодо впровадження бортових систем накопичення енергії (Energy Storage Systems) для максимального використання енергії рекуперативного гальмування.

Сформувати концептуальні пропозиції щодо модернізації застарілого парку локомотивів (заміна колекторних тягових двигунів на безколекторні, впровадження систем бортового накопичення енергії на базі суперконденсаторів).

Запропонувати критерії оптимізації топології тягового перетворювача та алгоритмів керування синхронними двигунами з постійними магнітами

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

(СДПМ) для застосування у магістральному та моторвагонному рухомому складі.

Спроекувати відмовостійкі топології тягових інверторів із резервуванням фазних модулів для забезпечення руху поїзда навіть у разі часткової відмови силової електроніки.

Оцінити надійність запропонованих електромеханічних комплексів за міжнародними стандартами RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) та розрахувати показники вартості життєвого циклу (LCC).

Запропонувати алгоритми інтелектуального керування енергоспоживанням (Smart Energy Management) для оптимізації режимів тяги та максимізації віддачі від рекуперативного гальмування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Steimel, A. (2008). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag.
2. Kondo, K. (2010). Recent trend and future prospects of traction drives. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 5(4), 411-416.
3. Hillmansen, S., Roberts, C., & Schmid, F. (2009). Energy storage devices in electric railway systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 223(4), 385-392.
4. Bae, C. H. (2009). The latest trend and future technologies of railway vehicle system. Journal of the Korean Society for Railway, 12(1), 1-10.
5. Profumo, F., Tenconi, A., Gianolio, S., & Murphy, M. (2001). Microprocessor-based digital control for AC traction drives: A review. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 48(4), 779-787.
6. Zhu, Z. Q., & Howe, D. (2007). Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. Proceedings of the IEEE, 95(4), 746-765. (Applies PMSM concepts to traction).
7. Brenna, M., Foiadelli, F., & Zaninelli, D. (2018). Electrical Railway Transportation Systems. IEEE Press/Wiley.
8. García-Tabarés, L., et al. (2010). A new high-efficiency PMSM drive for railway traction. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(1), 220-227.
9. Ruoho, S., Kinnunen, P., & Pyrhonen, J. (2011). Requirements for traction motor design in railway applications. IET Electrical Systems in Transportation, 1(2), 53-59.

10. International Electrotechnical Commission (IEC). (2017). IEC 62278: Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS).

11. Mayr, M., & Nuffer, R. (2014). High power SiC traction inverters for electric and hybrid vehicles. IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), 1-6.

12. Chymera, M., Renfrew, A. C., Barnes, M., & Holden, J. (2010). Modeling electrified transit systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 59(6), 2748-2756.

13. Barrero, R., Tackoen, X., & Van Mierlo, J. (2008). Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 222(3), 227-239.

14. Lujara, N. K., & Ekh, M. (2014). Life cycle cost (LCC) analysis of railway components. International Journal of Quality & Reliability Management, 31(8), 920-936.

15. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). (2015). EN 50463: Railway applications - Energy measurement on board trains.

16. Steimel, A. (2012). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag.

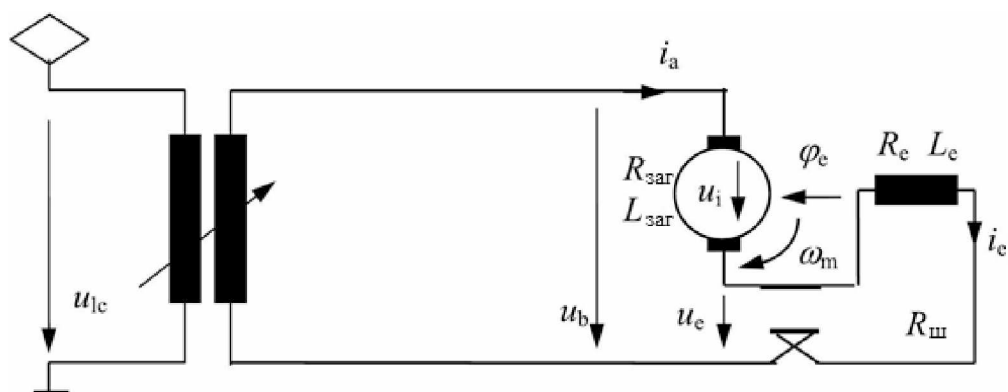
17. Bose, B. K. (2020). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends (2nd ed.). Academic Press.

18. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles (3rd ed.). CRC Press.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-01	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

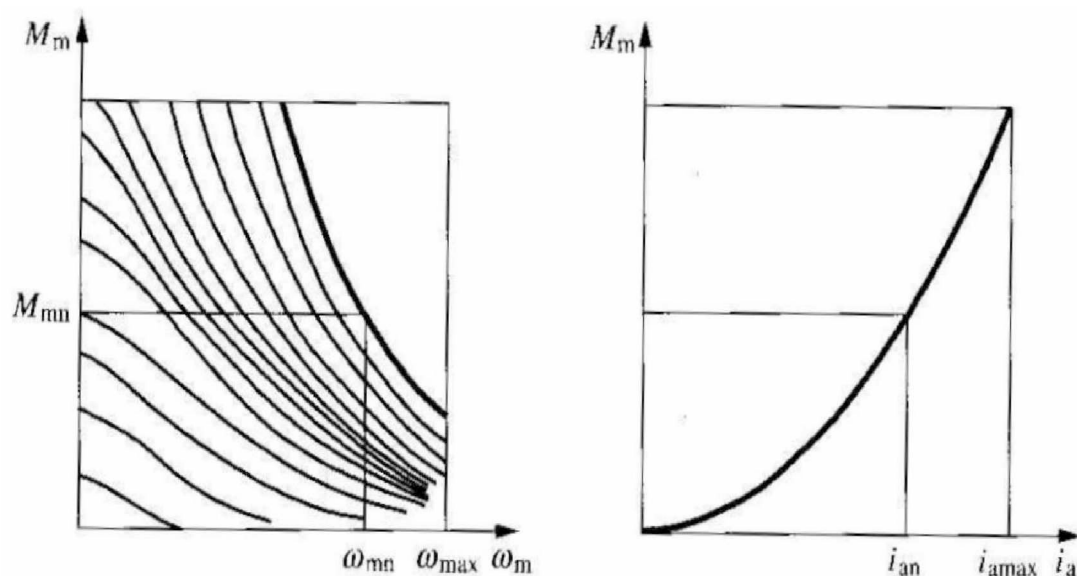
19. Kondo, K. (2010). Recent trend of traction drive systems for railway vehicles. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 5(1), 1-8.
20. Wang, B., & Wang, J. (2014). Fault-tolerant machine design and control for railway traction applications. IEEE Transactions on Industry Applications, 50(1), 284-293.
21. Standard IEC 61287-1:2014. Railway applications - Power converters installed on board rolling stock - Part 1: Characteristics and test methods.
22. Mierlo, J. V., Maggetto, G., & Lataire, P. (2006). Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles. Energy Conversion and Management, 47(17), 2748-2760.
23. Spagnolo, A., & Pugi, L. (2016). Real-time simulation and optimization of traction drives for light rail and industrial vehicles. Simulation Modelling Practice and Theory, 60, 114-131.
24. Ribeiro, E., & Marques, G. D. (2007). Power quality issues, reliability and filter design in industrial locomotive supply systems. European Power Electronics and Drives Journal, 17(3), 22-31.
25. Hill, R. J. (1994). Electric railway traction. Part 1: Electric traction and DC traction motor drives. Power Engineering Journal, 8(1), 47-56.
26. Song, K., & Lee, H. (2016). Design and control of a regenerative braking system for DC electric multiple units. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 65(9), 6981-6989.
27. Engel, B., Styczynski, Z. A., & Bongiorno, M. (2014). High-power converters and modern DC traction systems: Challenges and practical implementation. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 55, 305-312.

Послідовний двигун у тяговому режимі.

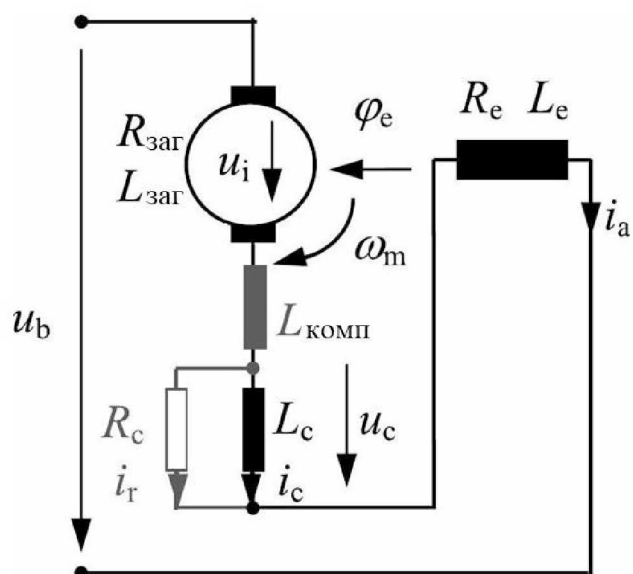


Додаток Б

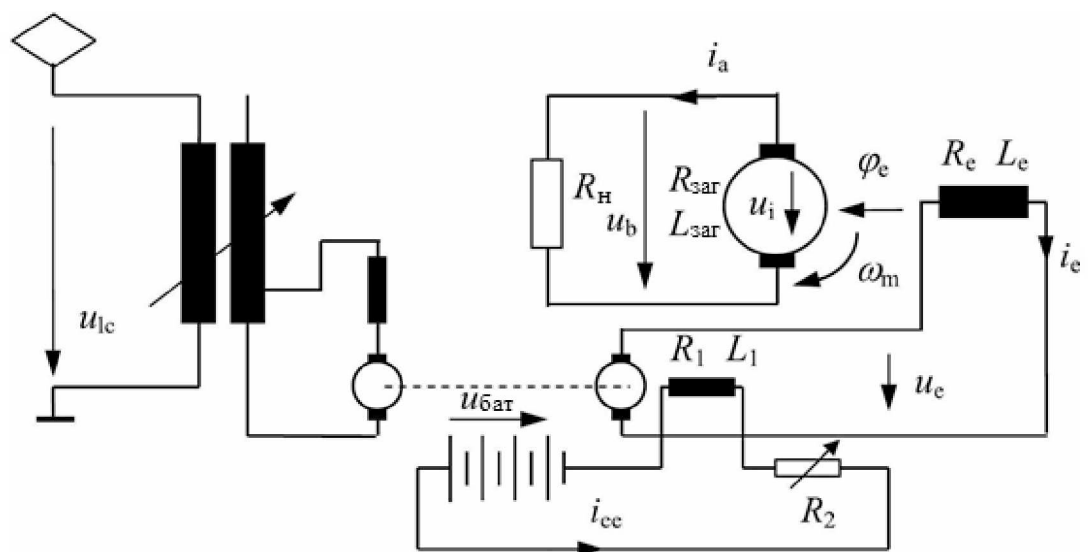
Характеристики крутного моменту в залежності від струму та швидкості.



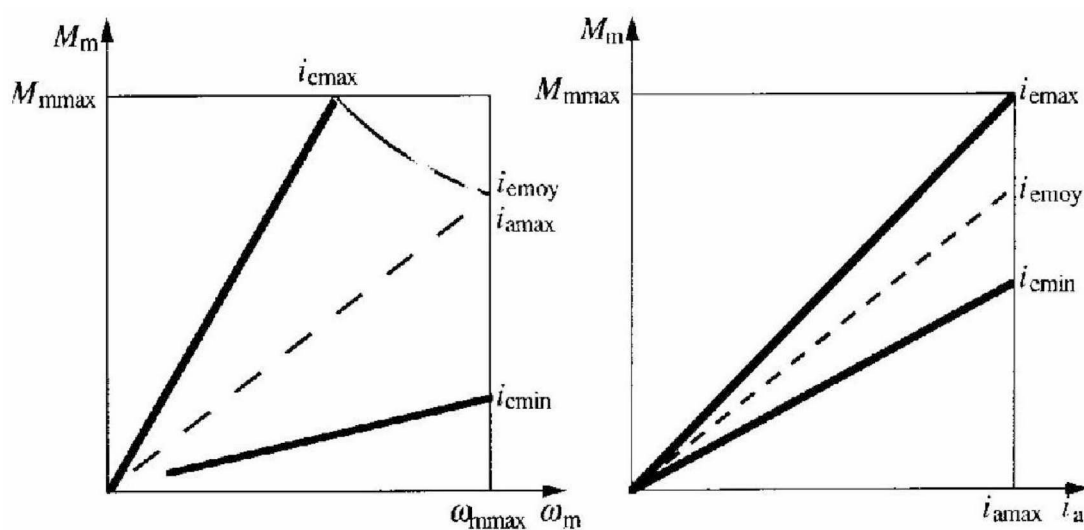
Обмотки однофазного двигателя.



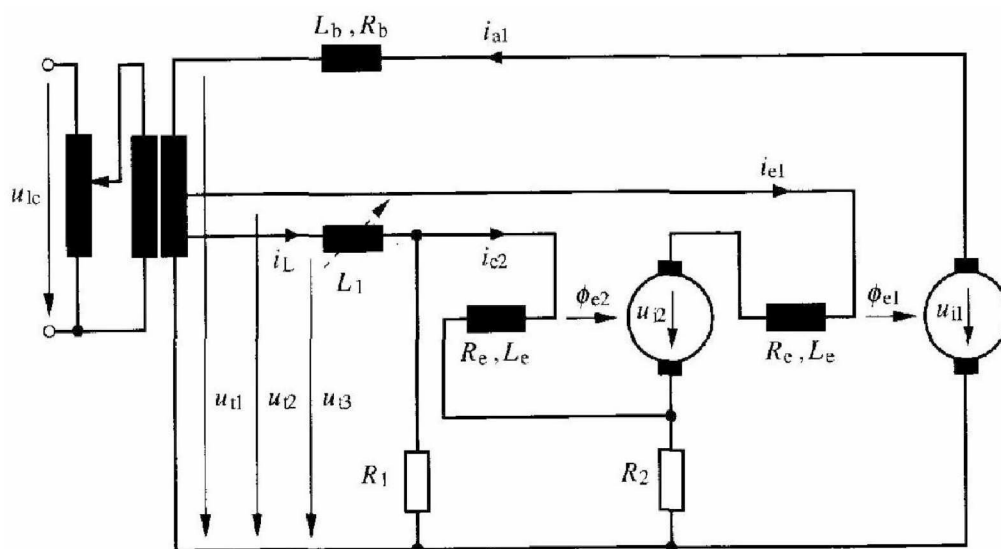
Реостатне гальмування при збудженні постійним струмом: схема з генераторною групою.



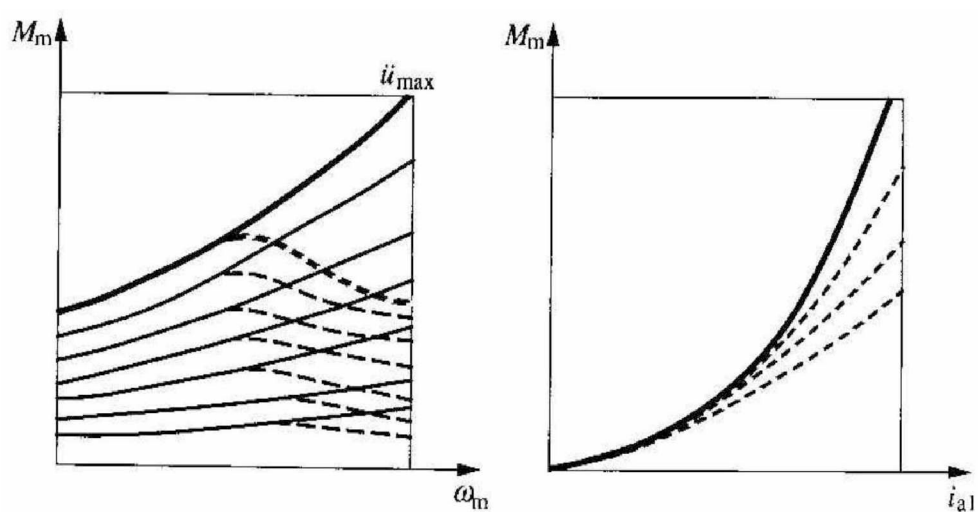
Реостатне гальмування під час збудження постійним струмом:
характеристики.



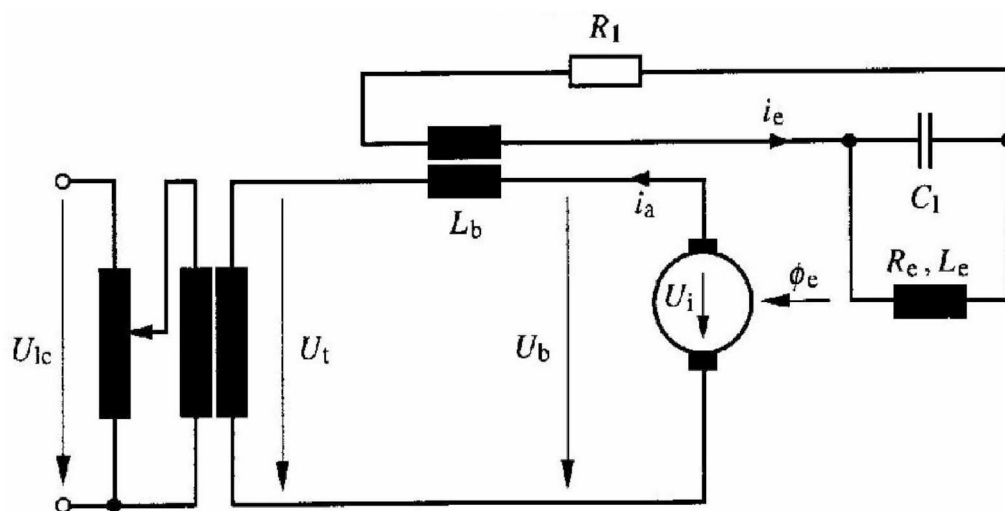
Рекуперативне гальмування із незалежним збудженням: схема із двигуном збудження.



Рекуперативне гальмування із незалежним збудженням:
характеристики.



Принципова схема гальмування з резонансним контуром.



Характеристики моменту під час гальмування з резонансним контуром.

