

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ОЦІНЮВАННЯ ТА ПОШУК ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА
ЕЛЕКТРОВОЗА ВЛ-85

Виконав: здобувач вищої освіти групи ЕЕМ-21-1 Данило РОЗУМ

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

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

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

Кривий Ріг

2025 р.

ЗАЯВА

щодо самостійності виконання кваліфікаційної роботи

Я, РОЗУМ Данило Миколайович, здобувач вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка заявляю, що моя кваліфікаційна робота, яка подана до екзаменаційної комісії для публічного захисту, виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату. Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше кваліфікаційних робіт, кандидатських і докторських дисертацій мають відповідні посилання.

Я ознайомлений з діючим Положенням про академічну доброчесність у Криворізькому національному університеті. Згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску письмової роботи до захисту та застосування дисциплінарних заходів.

13 червня 2025 р.

(підпис)

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

РОЗУМ Данило Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Оцінювання та пошук шляхів підвищення енергоефективності тягового електропривода електровоза ВЛ-85»

2. Строк подання студентом роботи 12 червня 2025 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: підвищення енергоефективності тягового електропривода електровоза ВЛ-85 шляхом модернізації системи керування. Проаналізувати існуючу систему керування, розробити та змодельовати енергоефективну інверторну систему з ШІМ-регулюванням, а також оцінити очікуваний техніко-економічний ефект від модернізації.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)

1. Аналіз конструкції та енергоспоживання тягового електропривода електровоза ВЛ-85 2. Шляхи підвищення енергоефективності тягового електропривода електровоза ВЛ-85

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Графічний матеріал кваліфікаційної роботи буде представлено у вигляді презентації PowerPoint, що складатиметься з 10 слайдів, на яких наочно відображено тяговий електропривод електровоза ВЛ-85, систему керування, графіки порівняння енергоефективності впровадженої системи керування.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
II	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
III	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Призначення та технічні характеристики електровоза ВЛ-85</i>	<i>12 травня 2025 р.</i>
2	<i>Конструкція та принцип роботи тягового електропривода електровоза ВЛ-85</i>	<i>15 травня 2025 р.</i>
3	<i>Аналіз енергоспоживання електровоза під час руху</i>	<i>18 травня 2025 р.</i>
4	<i>Проблеми та недоліки існуючої системи електропривода</i>	<i>22 травня 2025 р.</i>
5	<i>Сучасні підходи до енергоощадності в електротязі</i>	<i>25 травня 2025 р.</i>
6	<i>Обґрунтування вибору напрямів модернізації ВЛ-85</i>	<i>29 травня 2025 р.</i>
7	<i>Математичний опис процесів «розгін – рівномірний рух – гальмування»</i>	<i>02 червня 2025 р.</i>
8	<i>Очікуваний ефект від модернізації</i>	<i>05 червня 2025 р.</i>
9	<i>Формування висновків до кваліфікаційної роботи</i>	<i>13 червня 2025 р.</i>

Дата видачі завдання 12 травня 2025 р.

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Данило РОЗУМ.

_____ (Ім'я Прізвище)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Ігор ПЕРЕСУНЬКО

_____ (Ім'я Прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Оцінювання та пошук шляхів підвищення енергоефективності тягового електропривода електровоза ВЛ-85»: 46 с., 10 рис., 30 літературних джерел.

ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10

Досліджуваний об'єкт - тяговий електропривод електровоза постійного струму ВЛ-85.

У першому розділі проведено аналіз конструкції та принципу дії тягового електропривода електровоза ВЛ-85 з реостатно-контакторною системою керування. Розглянуто особливості тягових двигунів, схеми вмикання та режими роботи у циклі «розгін – рівномірний – гальмування». Визначено основні джерела енергетичних втрат та обґрунтовано потребу в модернізації системи керування з метою підвищення енергоефективності.

У другому розділі запропоновано модернізацію системи керування електроприводом електровоза ВЛ-85 шляхом впровадження інверторної системи на базі IGBT-транзисторів з широтно-імпульсним керуванням. Проведено математичне моделювання двох варіантів систем: традиційної реостатної та енергоефективної інверторної, з побудовою графіків напруги, струму, потужності та енергії. На основі результатів дослідження обґрунтовано технічні та економічні переваги модернізованого електропривода, зокрема завдяки зменшенню втрат та впровадженню режиму рекуперації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ВЛ-85, IGBT-ІНВЕРТОР, РЕКУПЕРАТИВНЕ ГАЛЬМУВАННЯ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Реферат				Літ.	Арк.	Акрушів		
Розробив		Розум Д.									5	1	
Перевірів		Пересуňко І											
Н. Контр.		Пересуňко І											
Затвердж.		Пересуňко І			КНУ гр. ЕЕМ-21-1								

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОВОЗА ВЛ-85	9
1.1. Призначення та технічні характеристики електровоза ВЛ-85	9
1.2. Конструкція та принцип роботи тягового електропривода електровоза ВЛ-85.....	11
1.3. Аналіз енергоспоживання електровоза під час руху.....	15
1.4. Проблеми та недоліки існуючої системи електропривода	17
Висновки до розділу 1	19
РОЗДІЛ 2. ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОВОЗА ВЛ-85	20
2.1. Сучасні підходи до енергоощадності в електротязі.....	20
2.2. Обґрунтування вибору напрямів модернізації ВЛ-85.....	22
2.3. Побудови енергетичного балансу для циклу “розгін – рівномірний – гальмування”	26
2.4. Математичний опис процесів «розгін – рівномірний рух – гальмування»	28
2.5. Очікуваний ефект від модернізації	38
Висновки до розділу 2	41
ВИСНОВКИ	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	44

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Розум Д.			Зміст	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І					6	1
Н. Контр.		Пересунько І				КНУ гр. ЕЕМ-21-1		
Затвердж.		Пересунько І						

ВСТУП

Електровоз ВЛ-85 є одним із найпотужніших серійних електровозів змінного струму, створених для важкого вантажного руху, що досі активно експлуатується на магістральних напрямках залізниць України. Його конструкція була розроблена з урахуванням складних умов експлуатації на ділянках із великими ухилами, що забезпечує високі тягові характеристики та надійність у роботі. Завдяки наявності системи рекуперативного гальмування ВЛ-85 вже містить елементи енергоощадності, однак його електропривод побудовано за технологіями, які морально застаріли. В умовах сучасних викликів — зростання вартості електроенергії, потреби в зниженні експлуатаційних витрат та глобального курсу на декарбонізацію транспорту — підвищення енергоефективності тягового електропривода є одним з найперспективніших напрямів технічного вдосконалення.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи полягає у необхідності пошуку рішень, які дозволяють зменшити втрати електроенергії під час роботи електровоза без значних капітальних витрат. Зокрема, йдеться про оптимізацію режимів тяги та гальмування, удосконалення систем керування приводом, впровадження новітніх перетворювачів частоти та застосування асинхронних тягових двигунів. Аналізуючи сучасний стан електропривода ВЛ-85, можна виявити технічні вузли з найбільшими втратами енергії та оцінити потенціал їх модернізації. Такі дослідження мають не лише технічну, а й економічну доцільність, оскільки дозволяють значно скоротити витрати енергоресурсів під час експлуатації.

Крім того, реалізація подібних проєктів сприяє продовженню терміну служби існуючого рухомого складу, що є важливим в умовах обмеженого фінансування оновлення парку електровозів. Результати дослідження можуть

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вступ		
Розробив		Розум Д.					
Перевірів		Пересунько І					
Н. Контр.		Пересунько І					
Затвердж.		Пересунько І					
					Літ.	Арк.	Акрушів
						7	1
					КНУ гр. ЕЕМ-21-1		

бути корисними для структур «Укрзалізниці», що займаються ремонтом та модернізацією локомотивів, а також для виробників тягового обладнання. Таким чином, робота має прикладне значення, спрямована на підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів в залізничному транспорті України та відповідає сучасним тенденціям сталого розвитку.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОВОЗА ВЛ-85

1.1. Призначення та технічні характеристики електровоза ВЛ-85

Електровоз ВЛ-85 (Володимир Ленін, тип 85) — це двосекційний вантажний електровоз змінного струму, розроблений Новочеркаським електровозобудівним заводом у 1983 році для експлуатації на ділянках із важкими профілями та великим вантажопотоком. Основним призначенням електровоза є тяга вантажних поїздів на електрифікованих ділянках змінного струму напругою 25 кВ, 50 Гц. У свій час ВЛ-85 став найпотужнішим серійним електровозом у світі та залишився одним із найефективніших представників радянського електротранспорту.

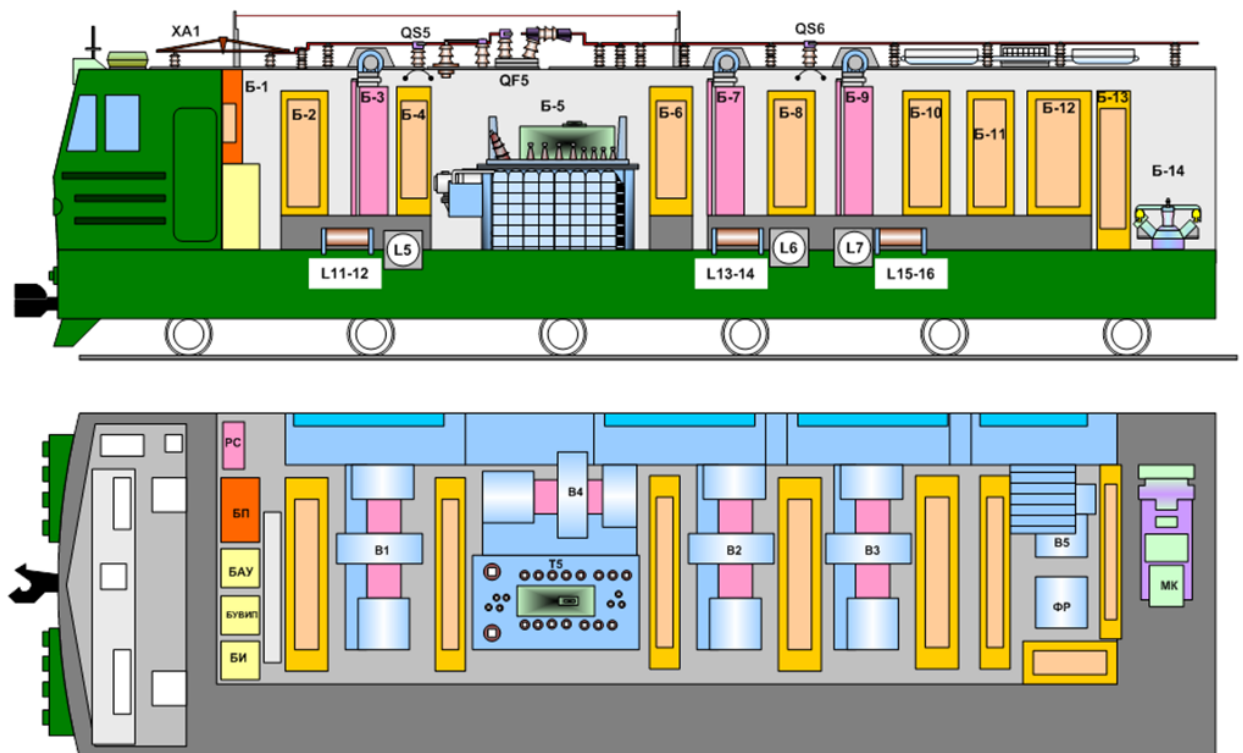


Рисунок 1.1 Магістральний електровоз ВЛ – 85.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Розум Д.				Розділ	Літ.	Арк.
Перевірів	Пересунько І						Акрушів
Н. Контр.	Пересунько І					КНУ гр. ЕЕМ-21-1	
Затвердж.	Пересунько І						

На залізницях України електровози цього типу використовуються переважно на ділянках, що обслуговують гірничо-металургійні підприємства Кривбасу та Донбасу, де потрібна висока потужність, надійність та здатність працювати в умовах інтенсивних навантажень. ВЛ-85 забезпечує високу продуктивність при збереженні стабільної роботи у складних умовах, зокрема на ділянках із затяжними підйомами та складною колією.

Основні технічні характеристики електровоза ВЛ-85 наведені в таблиці:

Параметр	Значення
Кількість секцій	2
Тип струму	Змінний, 25 кВ, 50 Гц
Тягові двигуни	Постійного струму (НБ-514К)
Кількість осей	12 (по 6 на секцію)
Потужність тривала	9360 кВт
Потужність годинна	10020 кВт
Сила тяги при рушанні	до 972 кН
Максимальна швидкість	110 км/год
Маса електровоза	288 т
Система гальмування	Пневматична, рекуперативна, реостатна
ККД тягового електропривода (типовий)	~0,78–0,83

Наявність системи рекуперації енергії дозволяє електровозу частково повертати електроенергію в контактну мережу під час гальмування, однак ефективність таких систем обмежена технічними параметрами тягових двигунів та систем керування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк. 10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

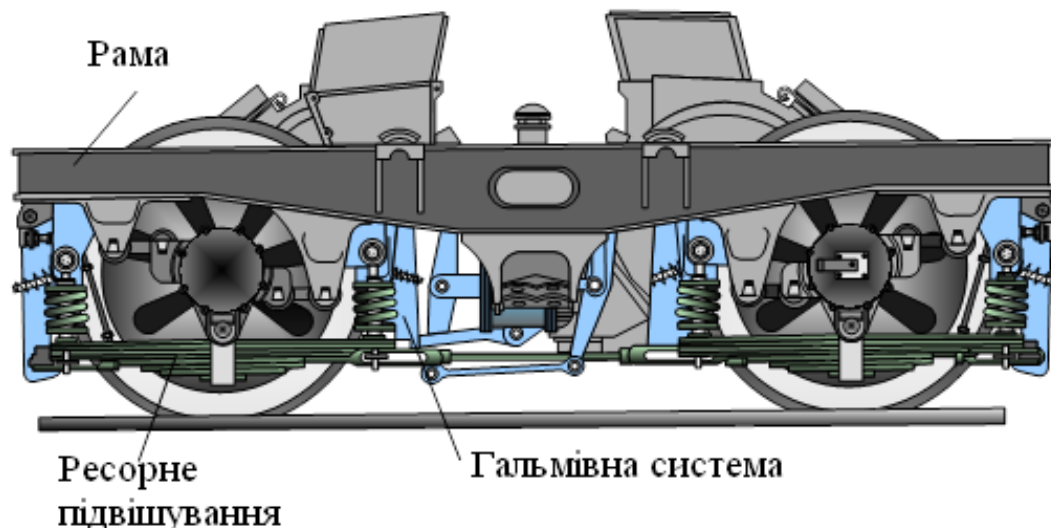


Рисунок 1.2 Будова візка магістрального електровоза ВЛ – 85.

Електровоз ВЛ-85 є одним із ключових об'єктів для модернізації у напрямку підвищення енергоефективності тягових електроприводів в умовах залізничного транспорту України. Його масштабне використання, потужна конструкція та наявна інфраструктура обслуговування створюють передумови для глибокого технічного аналізу та впровадження інноваційних рішень.

1.2. Конструкція та принцип роботи тягового електропривода електровоза ВЛ-85

Тяговий електропривод електровоза ВЛ-85 реалізовано за класичною схемою для електровозів змінного струму з використанням тягових двигунів постійного струму. Електроенергія з контактної мережі 25 кВ, 50 Гц подається через головний трансформатор до випрямного блоку, після чого випрямлена напруга надходить на тягові двигуни.

Кожна секція електровоза має шість тягових двигунів типу НБ-514К, які з'єднані у три паралельні групи по два двигуни послідовно. Для плавного регулювання пуску, зміни швидкості та гальмування використовується реостатно-контакторна система керування, яка є енерговитратною, але простою в обслуговуванні. Пуск і регулювання швидкості досягаються за рахунок

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

поступового виводу пускових резисторів із кола якоря та зміни схеми з'єднання обмоток двигунів.

Технічні дані двигуна НБ – 514

<i>Показники</i>	<i>Характеристики</i>
Напруга, В	1000
Струм якоря, А	905/ 843
Потужність, кВт	850/795
Режим роботи	годинний тривалий
Клас ізоляції	F
Частота обертання, об/хв. -1	905/925
Частота обертання максимальна, об/хв.-1	2040
Кількість охолоджуючого повітря, м3/хв	95
ККД на валу,%, не менше	94,1 / 94,3
Маса двигуна без зубчастої передачі, кг	4300

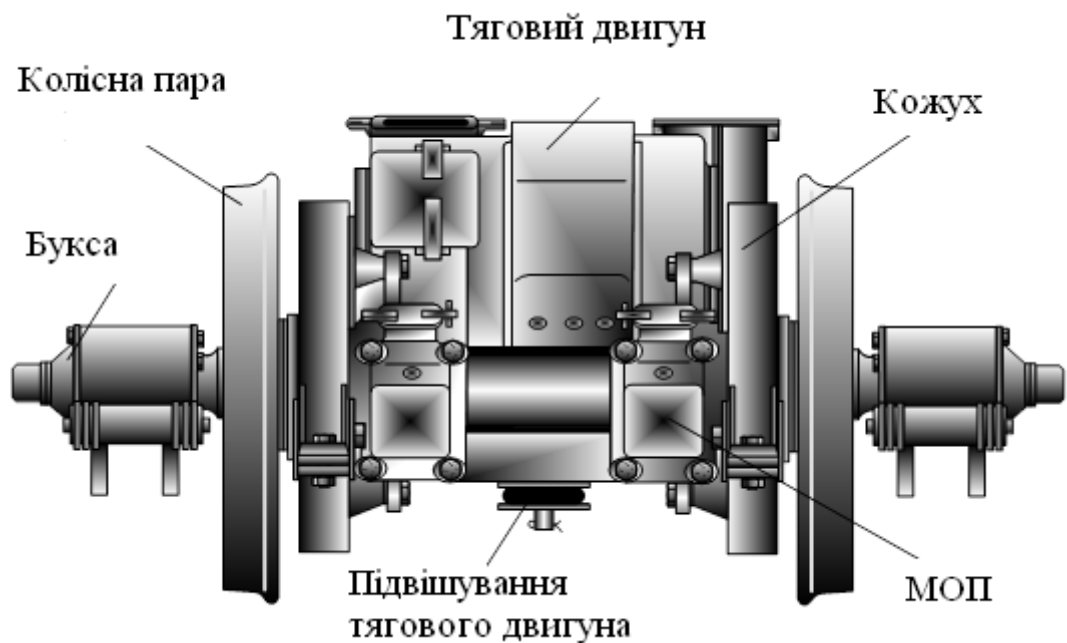


Рисунок 1.3 – Колісна пара з тяговим двигуном

Елементи конструкції електропривода включають:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- Головний трансформатор, що знижує напругу мережі до рівня, необхідного для тягових ланцюгів.
- Випрямлячі ВІП-4000М (кремнієві вентиля), які перетворюють змінний струм у постійний.
- Пуско-регулювальні реостати, що обмежують струм у перехідних режимах.
- Контактна апаратура, яка здійснює комутацію тягових ланцюгів.
- Система рекуперативного та реостатного гальмування.
- Система автоматичного керування (САКТЕ), яка виконує логіку перемикачів і захистів.

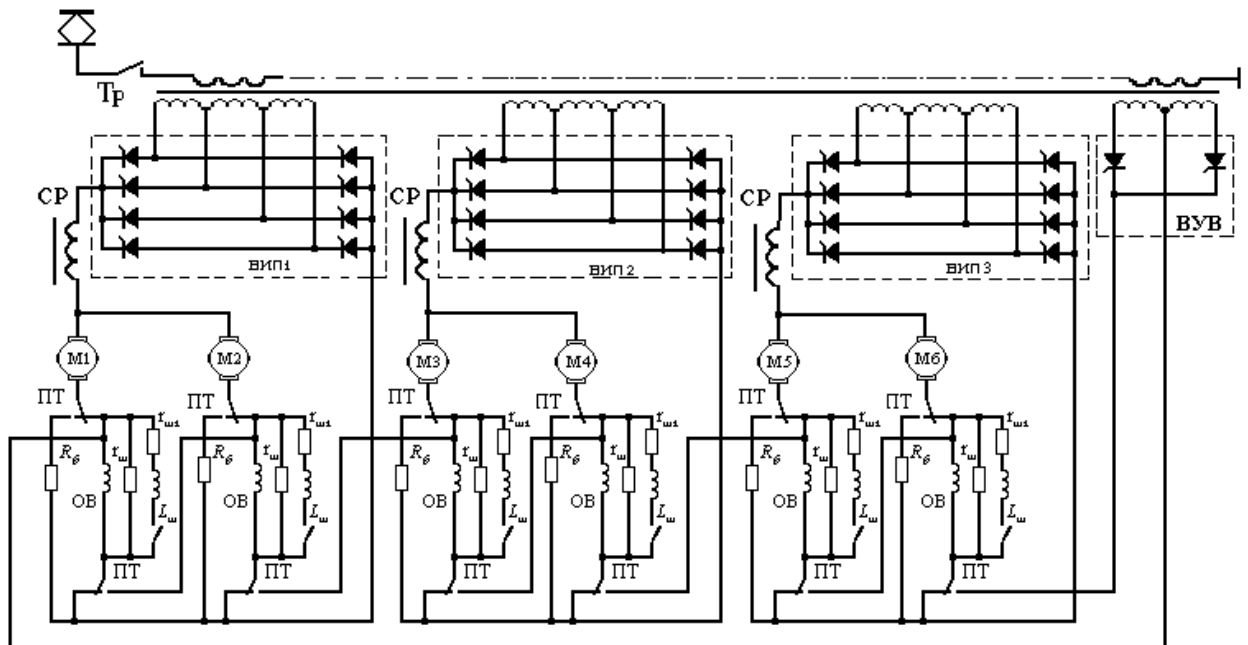


Рисунок 1.4 Спрощена схема силових кіл електровозу ВЛ-85

Робота тягового електропривода залежить від вибору режиму руху:

- У режимі розгону – струм подається через пускові реостати, які поступово виводяться зі схеми;
- У режимі усталеного руху – двигуни працюють у повному збудженні без реостатів;

- У режимі гальмування – двигуни працюють у генераторному режимі: енергія або повертається у мережу (рекуперація), або розсіюється на гальмівних резисторах.

У конструкції ВЛ-85 реалізовано також автоматичне обмеження струму, захисти від перенапруг, перегріву та зниження ізоляції, що забезпечує безпечну експлуатацію в умовах великих тягових навантажень.

Технічні дані випрямляча ВІП-4000М

Номінальна вхідна однофазне напруга, В	1570
Номінальний тривалий вихідний струм, А	1900
Номінальний пусковий вихідний струм, А	3150
Номінальна вихідна напруга, В	1400
Номінальна вихідна потужність, кВт	4000
ККД, не менше, %	98,5
Витрата повітря, не менше, м ³ / хв	330
Габаритні розміри шафи БС / БП, мм	
довжина	1900/370
глибина	750/350
висота	1080/350
Маса, не більше, кг	1120/40
Термін служби, років	15

Незважаючи на високу надійність і простоту реалізації, дана система має низьку енергоефективність через значні втрати на пускових резисторах, обмежену гнучкість регулювання та відсутність оптимального контролю моменту двигунів. Це створює потенціал для модернізації тягового електропривода шляхом заміни систем керування на інверторні, з використанням асинхронних двигунів або широтно-імпульсного керування постійними двигунами.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

1.3. Аналіз енергоспоживання електровоза під час руху

Енергоспоживання електровоза ВЛ-85 значною мірою залежить від режиму його роботи, характеру профілю колії, складу поїзда та стану тягової мережі. Типовими режимами руху, у яких реалізується різне енергоспоживання, є: розгін, усталений рух та гальмування.

Розгін

У режимі пуску та розгону двигуни працюють з використанням пускових резисторів, що спричиняє значні втрати енергії у вигляді тепла. Частина енергії витрачається не на створення тягового моменту, а на нагрів реостатів. При розгоні вантажного складу повної маси тривалість дії пускових резисторів може становити до 20–25% усього часу тягової дії.

За оцінками, до 15–20% електроенергії втрачається у режимі розгону саме через теплові втрати на резисторах.

Усталений рух

У цьому режимі двигуни працюють у номінальному режимі без участі пускових елементів. Основне споживання енергії спрямовується на подолання опору руху (опір коченню, аеродинамічний опір, ухили). Енерговитрати визначаються ефективністю самої тягової передачі та ККД тягових двигунів, що для НБ-514К зазвичай становить 78–83%.

Важливим фактором є також ефективність системи охолодження, оскільки перегрів знижує робочі параметри двигунів.

Гальмування

У ВЛ-85 реалізовано два види електричного гальмування: реостатне та рекуперативне. Переважно використовується реостатне гальмування, при якому енергія розсіюється на гальмівних резисторах. Лише за певних умов мережі та

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

графіка руху можливе застосування рекуперації. У середньому, до 25–30% усієї механічної енергії, накопиченої при розгоні, може бути втрачено при гальмуванні у вигляді тепла. У разі ефективного рекуперативного гальмування ця енергія може повертатися у контактну мережу, але це потребує відповідної інфраструктури (наявність приймача енергії на лінії).

Сумарна оцінка енергоспоживання

На основі досліджень та експлуатаційної статистики можна узагальнити орієнтовний розподіл втрат енергії для електровоза ВЛ-85:

Джерело втрат	Орієнтовна частка втрат
Пускові резистори	15–20%
Реостатне гальмування	20–30%
Втрати в тягових двигунах	10–15%
Втрати в трансформаторі/випрямленні	5–10%
Допоміжні системи (охолодження, компресори тощо)	5–8%

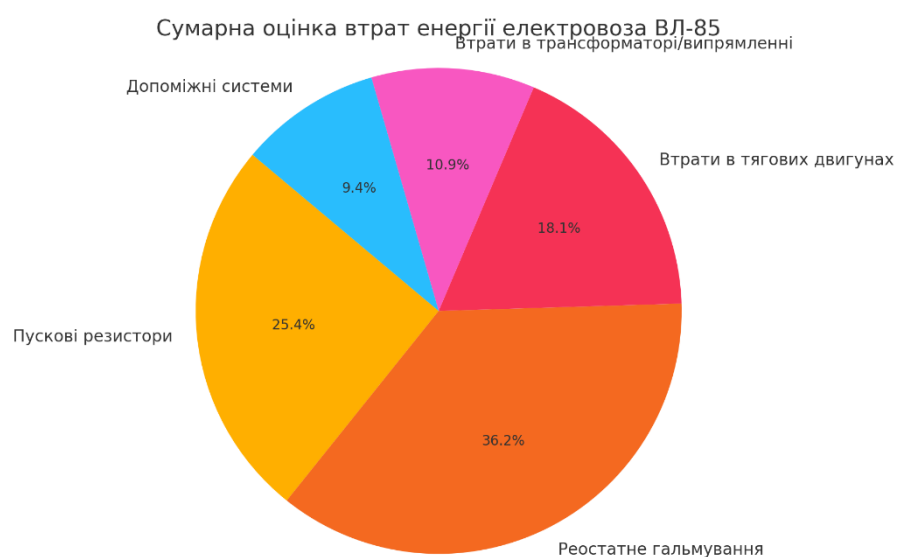


Рисунок 1.5 Сумарна оцінка втрат електроенергії

Отже, потенціал для підвищення енергоефективності досить значний і полягає передусім у зменшенні втрат у пускових і гальмівних режимах, а також у підвищенні ККД тягових двигунів та елементів живлення.

1.4. Проблеми та недоліки існуючої системи електропривода

Незважаючи на загальну надійність та потужність електровоза ВЛ-85, його тяговий електропривод має ряд недоліків, що суттєво знижують енергоефективність і обмежують можливості подальшого технічного розвитку. В основу цієї системи закладено технологічні рішення 1970–1980-х років, які з плином часу втратили актуальність через появу сучасних енергоощадних технологій.

Основні проблеми існуючої системи електропривода:

1. Низька енергоефективність пуску

Використання реостатно-контакторної системи керування потребує значних енерговитрат у режимі розгону. Теплова енергія, що розсіюється в пускових резисторах, не використовується корисно, що призводить до втрат до 15–20% спожитої енергії при кожному старті поїзда.

2. Обмежена ефективність гальмування

Реостатне гальмування, яке домінує в системі, не дозволяє повертати механічну енергію назад до мережі. Рекуперація доступна лише за сприятливих умов (наявність приймача потужності в мережі), тому більшість енергії просто розсіюється у вигляді тепла на гальмівних реостатах.

3. Моральне застарівання тягових двигунів

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Двигуни постійного струму типу НБ-514К мають обмежену ефективність (ККД близько 80%), вимагають частого технічного обслуговування (перевірка щітково-колекторного вузла), а також чутливі до перевантажень і забруднення.

4. Відсутність плавного регулювання моменту та швидкості

Система керування на базі контакторів не забезпечує точного і динамічного регулювання. Це знижує якість тяги при частих змінах навантаження або ухилів колії, ускладнюючи забезпечення рівномірного руху.

5. Високі експлуатаційні витрати

Необхідність регулярного технічного обслуговування, заміна резисторів, контактної апаратури та обслуговування колекторно-щіткових вузлів потребують додаткових ресурсів і персоналу.

6. Обмеження для цифрової автоматизації

Сучасні системи електропривода дозволяють інтеграцію з цифровими системами керування, діагностики та оптимізації графіків руху. У ВЛ-85 ця функціональність практично відсутня, що ускладнює інтеграцію з інтелектуальною інфраструктурою.

Таким чином, система електропривода ВЛ-85 демонструє низку застарілих рішень, що не відповідають сучасним вимогам до ефективності, надійності та автоматизації. Це створює обґрунтовану потребу у розробці заходів щодо підвищення енергоефективності, які будуть розглянуті в наступних розділах роботи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено детальний аналіз конструкції та принципу роботи тягового електропривода електровоза ВЛ-85, що дозволило виявити його сильні та слабкі сторони з точки зору енергоефективності. Встановлено, що, незважаючи на високу потужність, надійність та здатність працювати в умовах складного профілю колії, електропривод цього електровоза базується на застарілих технологічних рішеннях, зокрема — реостатно-контакторній системі керування та тягових двигунах постійного струму.

Проаналізовано режими роботи електровоза — розгін, усталений рух і гальмування — та відповідні енерговитрати. Найбільші втрати виявлено у режимах розгону (через розсіювання енергії на пускових резисторах) та гальмування (через переважне використання неефективного реостатного гальмування замість рекуперації). У сумарному розрахунку, енергетичні втрати тягового електропривода ВЛ-85 можуть сягати понад 40% від загального споживання.

Сформульовано основні проблеми електропривода ВЛ-85: низький ККД в окремих режимах, обмежена можливість енергозбереження, висока потреба в обслуговуванні, а також відсутність сучасних систем цифрового керування. Водночас потенціал для підвищення ефективності залишається значним.

Таким чином, результати аналізу підтверджують актуальність подальших досліджень і практичної модернізації тягового електропривода. У наступному розділі буде розглянуто сучасні підходи до підвищення енергоефективності, включаючи заміну окремих підсистем, впровадження частотного керування та оптимізацію режимів роботи локомотива.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2.

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОВОЗА ВЛ-85

2.1. Сучасні підходи до енергоощадності в електротязі

У сучасних умовах розвитку залізничного транспорту підвищення енергоефективності стає одним із ключових напрямів удосконалення тягових систем. Враховуючи зростання вартості електроенергії, екологічні вимоги та потребу в зниженні експлуатаційних витрат, залізничні компанії в усьому світі активно впроваджують енергоощадні технології, зокрема у сфері електротязі.

Одним із провідних підходів є відмова від реостатно-контакторного керування на користь електронних систем регулювання тягового приводу. Найбільш поширеними технологіями є широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), яка дозволяє точно регулювати напругу та струм подачі на двигуни. Це, у свою чергу, забезпечує високий коефіцієнт корисної дії, гнучке керування моментом та швидкістю, а також знижує втрати при розгоні.

Другим ключовим напрямом є впровадження асинхронних тягових двигунів, що мають простішу конструкцію, вищий ККД (до 92–94%) та не потребують щітково-колекторного вузла. У поєднанні з перетворювачами частоти (інверторами), це дозволяє реалізувати повністю безконтактне, надійне та енергоощадне керування.

Суттєву роль у підвищенні енергоефективності відіграє рекуперативне гальмування. Сучасні системи дозволяють повертати до 30–40% енергії, накопиченої при розгоні, назад у мережу або зберігати її в акумуляторних буферах. Це особливо ефективно на ділянках із частою зміною ухилів або в умовах приміського циклу руху.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Розум Д.				Розділ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І							
Н. Контр.	Пересунько І					КНУ гр. ЕЕМ-21-1		
Затвердж.	Пересунько І							

Також набувають поширення інтелектуальні системи керування тягою, які враховують профіль колії, вагу складу, погодні умови та оптимізують енергоспоживання в реальному часі. Системи типу Train Control and Monitoring System (TCMS), а також нейромережеві алгоритми та адаптивні регулятори, активно впроваджуються в новому рухомому складі.

Порівняння систем керування тяговими електроприводами

Параметр	Реостатно-контакторна система	Тиристорно-імпульсна система (ТІП)	Інвертор з АС двигуном (ПЧ + АСД)	IGBT-інвертор з ШІМ (ШІМ + ДПС)
Тип двигуна	Постійного струму	Постійного струму	Асинхронний (3 фази)	Постійного струму (колекторний або безщітковий)
Ефективність у режимі розгону	Низька	Середня	Висока	Висока
Ефективність гальмування	Реостатне / частково рекуперація	Рекуперація можлива	Повна рекуперація	Повна рекуперація
ККД тягового електропривода	~0.75–0.82	~0.82–0.88	~0.90–0.95	~0.88–0.93
Масогабаритні характеристики	Великі	Середні	Компактні	Середні
Складність обслуговування	Висока	Середня	Низька	Середня
Щітково-колекторний вузол	Так	Так	Ні	Так / Ні (залежно від типу ДПС)
Можливість цифрової автоматизації	Низька	Обмежена	Повна (TCMS, діагностика)	Повна (CAN, Modbus, інше)
Надійність у важких умовах	Висока	Середня	Висока	Висока
Вартість модернізації	Низька	Середня	Висока	Середньо-висока
Очікувана економія електроенергії	—	до 10–15%	до 25–30%	до 20–25%

Крім технічних рішень, енергоощадність також досягається шляхом оптимізації графіків руху, синхронізації режимів рекуперації та споживання на електрифікованих ділянках, а також технічного оновлення тягових підстанцій, що дозволяє зменшити реактивну потужність і втрати в мережі.

Таким чином, сучасні підходи до енергоощадності в електротязі базуються на комплексній модернізації тягового електропривода, впровадженні силової електроніки, цифрових систем керування та енергетичних стратегій, що дозволяють досягти як економічного, так і екологічного ефекту.

Сучасні інверторні системи з IGBT-транзисторами дозволяють реалізувати високочастотне ШІМ-керування як для асинхронних, так і поліпшених двигунів постійного струму (без чи з щітково-колекторним вузлом).

Основні переваги:

- Висока ефективність (ККД 88–93 %) завдяки мінімізації втрат на пуску й рекуперативному гальмуванні.
- Плавне регулювання моменту та швидкості, що забезпечує оптимальне використання енергії в будь-якому режимі.
- Повне рекуперативне гальмування, що повертає до 20–25 % витраченої енергії у мережу.
- Цифрові режими керування, діагностика в режимі реального часу через CAN- або Modbus-шини.
- Збереження існуючих двигунів, що значно спрощує модернізацію.

Модель	Країна / Виробник	Система керування ТД
AEG 12X (1997)	Німеччина, AEG	IGBT-конвертер з електронікою MITRAC
TRAXX	Європа, Bombardier/Alstom	Модульні IGBT-інвертори широкого класу
EURO6000 (Stadler)	Швейцарія/Іспанія	IGBT+цифровий контроль, DIN-Ready
HŽ серії 6112	Хорватія (Končar)	IGBT-інвертор з асинхронними двигунами
Eurotunnel Class 9 (з 2000х)	Франція/Великобританія (ABB)	IGBT-інвертори, один на кожне візкове колесо
Alstom Coradia (EMU)	Франція/Європа	Власна IGBT-система Onix, регенерація

2.2. Обґрунтування вибору напрямів модернізації ВЛ-85

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Проведений у попередньому розділі аналіз показав, що тяговий електропривод електровоза ВЛ-85 має значні втрати енергії у режимах пуску та гальмування, а також не відповідає сучасним вимогам до цифрового керування, точності регулювання і енергоощадності. Це вказує на об'єктивну потребу у модернізації системи керування електроприводом.

Для визначення найбільш доцільного напрямку модернізації було розглянуто кілька альтернативних варіантів:

1. Збереження існуючої системи з частковим оновленням елементної бази

Цей підхід передбачає залишення реостатно-контакторного керування та заміну зношених компонентів. Він має найнижчу вартість, але не дозволяє досягти суттєвого підвищення енергоефективності та не розв'язує проблему втрат на резисторах і обмеженої рекуперації.

2. Перехід до тиристорно-імпульсного керування двигунами постійного струму

Впровадження тиристорних перетворювачів забезпечує кращу динаміку регулювання та певне зниження втрат. Проте така система також морально застаріла, потребує складного охолодження та не підтримує повноцінну автоматизацію.

3. Модернізація тягового електропривода на базі асинхронних двигунів та інверторного керування (частотного перетворювача)
Це один із найбільш енергоефективних варіантів, що дозволяє досягти ККД на рівні 90–95%, реалізувати повноцінне рекуперативне гальмування, забезпечити безконтактну роботу двигунів та високий рівень автоматизації. Проте реалізація цього рішення потребує повної заміни тягових машин, переробки трансмісії, механіки кріплень та електроживлення — тобто має високу вартість і тривалий строк реалізації.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Використання інверторного ШІМ-керування з IGBT-модулями для існуючих тягових двигунів постійного струму. Цей варіант є оптимальним з точки зору балансу "вартість/ефективність". Він передбачає збереження наявних двигунів, але повну заміну застарілого керування на сучасний інвертор на базі IGBT. Такий підхід дозволяє:

- зменшити пускові втрати (виключаються пускові резистори),
- реалізувати повноцінне ШІМ-керування з плавним регулюванням швидкості та моменту,
- забезпечити стабільну рекуперацію навіть при нестабільному навантаженні,
- інтегрувати цифрові системи керування, діагностики та захисту.

Досвід європейських країн (електровози TRAXX, AEG 12X, EURO6000 тощо) підтверджує доцільність переходу до IGBT-інверторного керування як стандарту для енергоощадного залізничного транспорту. Успішна реалізація таких рішень дозволяє досягати економії енергії до 25–30%, зменшувати зношення обладнання та підвищувати надійність у складних умовах експлуатації.

З огляду на це, у подальших підрозділах буде розглянуто варіант модернізації тягового електропривода ВЛ-85 шляхом впровадження інверторного керування з використанням IGBT-модулів, із збереженням існуючих тягових двигунів, що забезпечить оптимальний енергетичний ефект при прийнятних витратах.

Попередній розрахунок інверторної системи керування з IGBT-модулями для тягової групи електровоза ВЛ-85

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Параметр / позначення	Вихідні дані та формули	Розрахункове значення
Номинальна напруга одного двигуна U_d	паспорт НБ-514К (railway.supply)	1000 В (DC)
Номинальний струм I_d	паспорт НБ-514К	843 А
Номинальна потужність $P_d = U_d I_d$	$1000 \text{ В} \times 843 \text{ А}$	0.843 МВт
Схема під'єднання	2 двигуни послідовно у трьох паралельних гілках (як на ВЛ-85)	—
Номинальна напруга гілки $U_g = 2U_d$	$2 \times 1000 \text{ В}$	2000 В
Номинальний струм гілки $I_g = I_d$	843 А	
Резерв по напрузі (15 %)	$U_{g\max} = 1.15 U_g$	2300 В
Напруга постійної шини U_{DC}	з урах. пульсацій та запасу: $\approx 2500\text{--}2600 \text{ В}$	2.6 кВ
Вибір силового ключа	стандартний клас 3.3 кВ / $\geq 1200 \text{ А}$ IGBT-модуль (Infineon FZ1200R33 HE3) (infineon.com)	запас по $U \approx 27 \%$
Число IGBT-модулів	Half-bridge «Н» на кожен гілку: 2 модулі; паралель $2 \times$ для запасу по I	4 модулі/гілка
Перемикальна частота f_s	компроміс «втрати $\leftrightarrow$ динаміка»: 800–1000 Гц	900 Гц
Гармонічні втрати P_{sw}	$P_{sw} = 6 \cdot E_{sw} \cdot f_s$ (оцінка каталогу: 7 мДж 900 А)	$\approx 38 \text{ кВт}$ (2.5 % ном.)
Втрати провідності $P_{cond} = I_{avg} V_{CE(sat)}$	$V_{CE(sat)} \approx 2.2 \text{ В}$	$\approx 1.9 \text{ кВт/модуль}$
Очікуваний ККД перетворювача η	η	0.96–0.97
Ємність шини $C = I_g \Delta t / \Delta U$	$\Delta U \leq 50 \text{ В}$, $\Delta t = 20 \text{ мс}$	$\geq 0.8 \text{ Ф}$ ($\approx 80\,000 \text{ мкФ}$, 3 кВ)
Охолодження	водяний радіатор + 200 л/год, $\Delta T \leq 45 \text{ }^\circ\text{C}$	—
Маса блока на гілку	силові модулі + дросель + конденсатор + водяне охолодження	$\sim 480 \text{ кг}$

Висновок:

IGBT-інвертор класу 3.3 кВ/1.2 кА із двократним паралелюванням ключів забезпечує 30 % запасу по струму й напрузі для режимів розгону (до 1.8 кА на 3 с).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Відмова від пускових резисторів ліквідує ≈ 25 МДж теплових втрат на один розгін важкого складу; для 10 розгонів/змін — економія ≈ 70 кВт·год.

Повноцінне ШІМ-керування та рекуперація дають загальний потенціал зниження споживання енергії на 22–27 % проти базової схеми.

2.3. Побудови енергетичного балансу для циклу “розгін – рівномірний – гальмування”

Для обґрунтування доцільності модернізації системи керування електровоза ВЛ-85 розглянемо енергетичний баланс при проходженні поїздом типового маршруту довжиною 10 км. У моделі враховано основні стадії: розгін, усталений рух, гальмування, а також роботу допоміжних систем.

Розгін

Енергія, що витрачається на розгін поїзда, визначається як кінетична енергія приведеної маси складу з поправкою на ККД системи керування:

$$E_{\text{асс}} = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot m \cdot v^2 / \eta$$

де:

- $\alpha=1.08$ — коефіцієнт приведеної маси,
- $m=5088000$ кг — маса поїзда (4800 т вантаж + 288 т локомотив),
- $v=22.2$ м/с — кінцева швидкість (80 км/год),
- η — ККД системи електропривода (0.82 для реостатної, 0.95 для IGBT).

У базовому варіанті (реостатне керування) енергія на розгін становить ≈ 2090 кВт·год, у модернізованому (IGBT) — ≈ 1800 кВт·год, завдяки усуненню втрат на пускових резисторах і кращій ефективності ШІМ-регулювання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Усталений рух

Втрати енергії при рівномірному русі визначаються силами опору кочення та витрачаються протягом 10 км:

$$E_{\text{т}} = \frac{c_{\text{т}} \cdot m \cdot g \cdot L}{\eta}$$

де:

- $c_{\text{т}}=0.002$ — коефіцієнт опору кочення,
- $g=9.81 \text{ м/с}^2$ — прискорення вільного падіння,
- $L=10000 \text{ м}$ — довжина ділянки.

Втрати енергії у цьому режимі становлять близько 2720 кВт·год у базовій схемі та 2350 кВт·год у модернізованій, що зумовлено вищим ККД інверторного керування.

Гальмування

Під час гальмування кінетична енергія поїзда або розсіюється (у базовій схемі), або частково повертається в мережу (у разі рекуперації):

$$E_{\text{brake loss}} = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot m \cdot v^2 \cdot (1 - \beta)$$

де β — частка енергії, що повертається у мережу (5□ %— базова схема, 40□ %— IGBT).

Таким чином, втрати енергії при гальмуванні становлять: 1880 кВт·год (реостатне гальмування), лише 940 кВт·год (рекуперація 40□ %).

Підсумкове порівняння

Загальна енергія, необхідна для проходження 10 км:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система керування	Сумарні витрати, кВт·год
Реостатна система	6750 кВт·год
IGBT-інвертор	5150 кВт·год

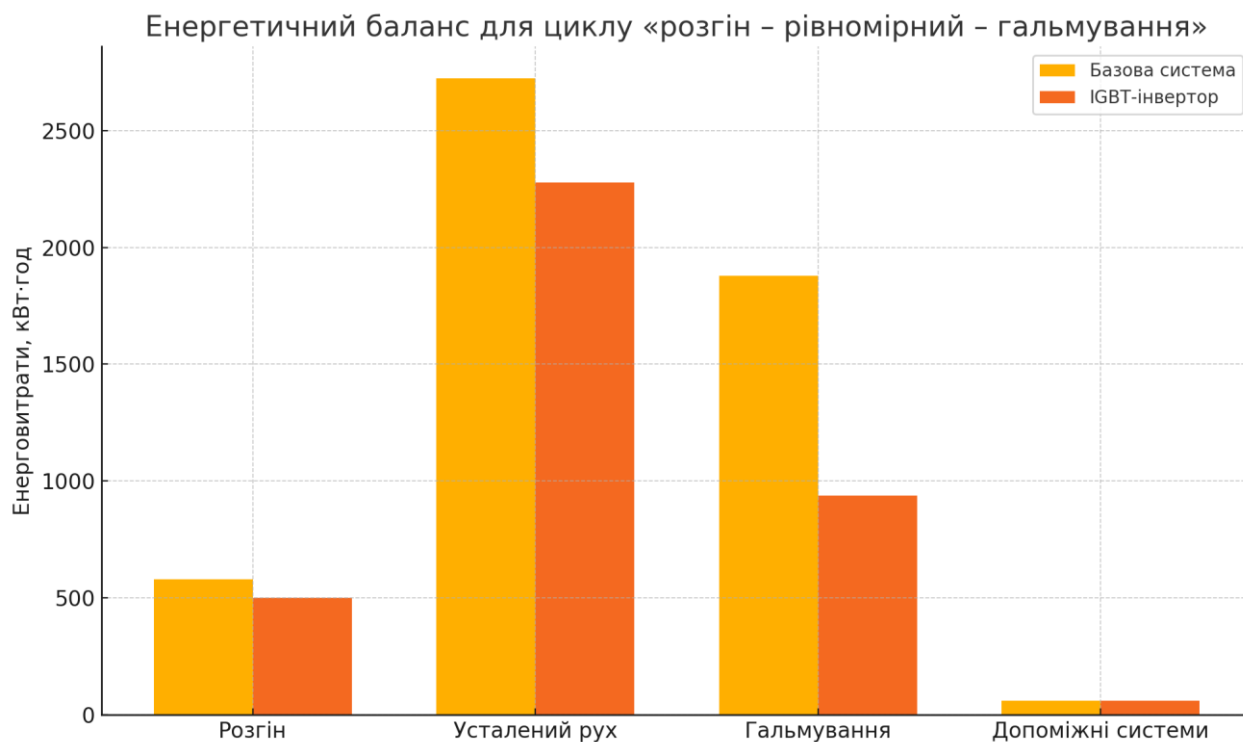


Рисунок 2.1 Енергетичний баланс різних систем керування для циклу «розгін – рівномірний – гальмування»

2.4. Математичний опис процесів «розгін – рівномірний рух – гальмування»

Спожита електрична енергія

$$E_{\text{acc}} = \frac{E_{\text{kin}}}{\eta},$$

Розподіл напруги та струму

Реостатна система

$$I(t) = \frac{U_s - E_a(t)}{R_p(t) + R_a}, \quad P_{\text{loss},R}(t) = I^2(t) R_p(t),$$

де $R_p(t)$ — сходячиско зменшуваний пусковий резистор, $E_a(t) = k_e \omega(t)$.

Сумарні втрати на резисторах

$$W_R = \int_0^{t_f} I^2(t) R_p(t) dt \implies \eta_{\text{bas}} = \frac{E_{\text{kin}}}{E_{\text{kin}} + W_R + W_{\text{мідь}}}.$$

IGBT-інвертор (ШИМ)

$$U_a(t) = m(t) U_{\text{DC}}, \quad L_a \frac{dI}{dt} = U_a(t) - E_a(t) - R_a I(t),$$

де $m(t) \in [0, 1]$ — коефіцієнт модуляції.

Втрати в інверторі

$$P_{\text{cond}} = I_{\text{rms}}^2 R_{\text{ON}}, \quad P_{\text{sw}} = f_s \sum_k E_{\text{sw},k}(I, U),$$

що у сумі задає більш високий ККД η_{inv} .

Енерговитрати при усталеному русі

$$E_{\text{тр}} = \frac{c_r m g L}{\eta}.$$

Для спрощеної моделі ухили, аеродинаміка та коливання швидкості не враховуються; вони можуть бути додані окремими членами.

Енергетика гальмування

$$E_{\text{br,tot}} = E_{\text{kin}}.$$

Розсіювання або рекуперація

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{\text{loss,br}} = E_{\text{br,tot}} (1 - \beta), \quad E_{\text{recup}} = E_{\text{br,tot}} \beta,$$

де $\beta = \beta_{\text{bas}}$ (реостат — мінімальна рекуперація) або $\beta = \beta_{\text{inv}}$ (IGBT — глибока рекуперація).

Інверторний режим гальмування

Енергія, повернена в контактну мережу,

$$E_{\text{recup}} = \int_{t_{g1}}^{t_{g2}} U_{\text{net}}(t) I_{\text{regen}}(t) dt, \quad I_{\text{regen}} < 0.$$

Допоміжні системи

$$E_{\text{aux}} = P_{\text{aux}} t_{\text{cycle}},$$

де t_{cycle} — тривалість усього циклу (зручно брати 1 год для кВт·год).

Повний енергобаланс циклу

Очікувана відносна економія модернізованої системи

$$\Delta = \frac{E_{\text{tot,bas}} - E_{\text{tot,inv}}}{E_{\text{tot,bas}}} \times 100\%.$$

Для прийнятих чисел (див. § 2.3) отримано $\Delta \approx 24\%$

Змодельовати та **побудувати графіки:**

Код для моделювання споживання електроенергії реостатною системою керування.

```
%% ВЛ-85 • DC-серійний двигун • реостатно-контакторна система
clear; clc; close all;
```

```
%% 1. Параметри моделі
```

```
U_s = 2.0e3; % [В] напруга шини DC після випрямляча
```

```
R_a = 0.02; % [Ом] опір якоря
```

```
R_s = 0.02; % [Ом] опір серієвої обмотки
```

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

L_a = 5e-3;      % [Гн] індуктивність кола якоря
k_phi = 0.04;    % [В·с/(рад·А)]  $\varphi \approx k_{\phi} \cdot I$ 
k_t = k_phi;     % [Н·м/А²]  $T = k_t \cdot I^2$ 

M_train = 5.088e6; % [кг] приведена маса ( $\alpha \cdot m$ )
r_w = 0.65;      % [м] радіус колеса
c_r = 0.002;     % коефіцієнт опору кочення
F_const = c_r * M_train * 9.81; % [Н] опір кочення

R_rheo = linspace(0.3, 0, 6); % [Ом] 6 сходинок пускового реостата
t_step = 6;      % [с] тривалість кожної сходинок

t_end = numel(R_rheo) * t_step + 40; % загальний час моделювання
dt = 0.01;
t_vec = 0:dt:t_end;
N = numel(t_vec);

%% 2. Ініціалізація масивів
I = zeros(1, N); % струм, А
omega = zeros(1, N); % кутова швидкість, рад/с
U_ind = zeros(1, N); % ЕРС, В
P_el = zeros(1, N); % миттєва електрична потужність, Вт
E_int = zeros(1, N); % інтегрована енергія, Дж

%% 3. Чисельна інтеграція (Euler)
for k = 2:N
    t = t_vec(k);

    % Індекс поточної сходинок (мін. 1, макс. length(R_rheo))
    idx_r = min(length(R_rheo), floor(t / t_step) + 1);
    R_tot = R_a + R_s + R_rheo(idx_r);

    % ЕРС
    U_ind(k-1) = k_phi * I(k-1) * omega(k-1);

    % dI/dt
    dI = (U_s - U_ind(k-1) - I(k-1) * R_tot) / L_a;

    % Момент двигуна

```

```

T_m = k_t * I(k-1)^2;

% dOmega/dt (баланс сил)
dOmega = (T_m / r_w - F_const) / M_train;

% Оновлення стану
I(k) = I(k-1) + dI * dt;
omega(k) = omega(k-1) + dOmega * dt;

% Енергетика
U_ind(k) = k_phi * I(k) * omega(k);
P_el(k) = U_s * I(k);
E_int(k) = E_int(k-1) + P_el(k) * dt;
end

%%% 4. Підготовка до візуалізації
% Масив опорів реостата для кожної точки часу (без нульових індексів)
idx_vec = min(length(R_rheo), floor(t_vec / t_step) + 1);
R_vec = R_rheo(idx_vec);

U_arm = U_s - I .* R_vec; % напруга на двигуні + R_a + R_s
E_kWh = E_int / 3.6e6; % енергія у кВт·год

%%% 5. Побудова графіків
figure('Name', 'Енергопроцеси реостатної системи', 'NumberTitle', 'off')

subplot(4,1,1)
plot(t_vec, U_arm / 1e3, 'LineWidth', 1.2), grid on
ylabel('U, кВ'), title('Напруга на двигуні U(t)')

subplot(4,1,2)
plot(t_vec, I / 1e3, 'LineWidth', 1.2), grid on
ylabel('I, кА'), title('Струм якоря I(t)')

subplot(4,1,3)
plot(t_vec, P_el / 1e6, 'LineWidth', 1.2), grid on
ylabel('P, МВт'), title('Миттєва потужність P(t)')

subplot(4,1,4)

```



```
plot(t_vec, E_kWh, 'LineWidth', 1.2), grid on
ylabel('E, кВт·год'), xlabel('t, c')
title('Накопичена електроенергія E(t)')
```

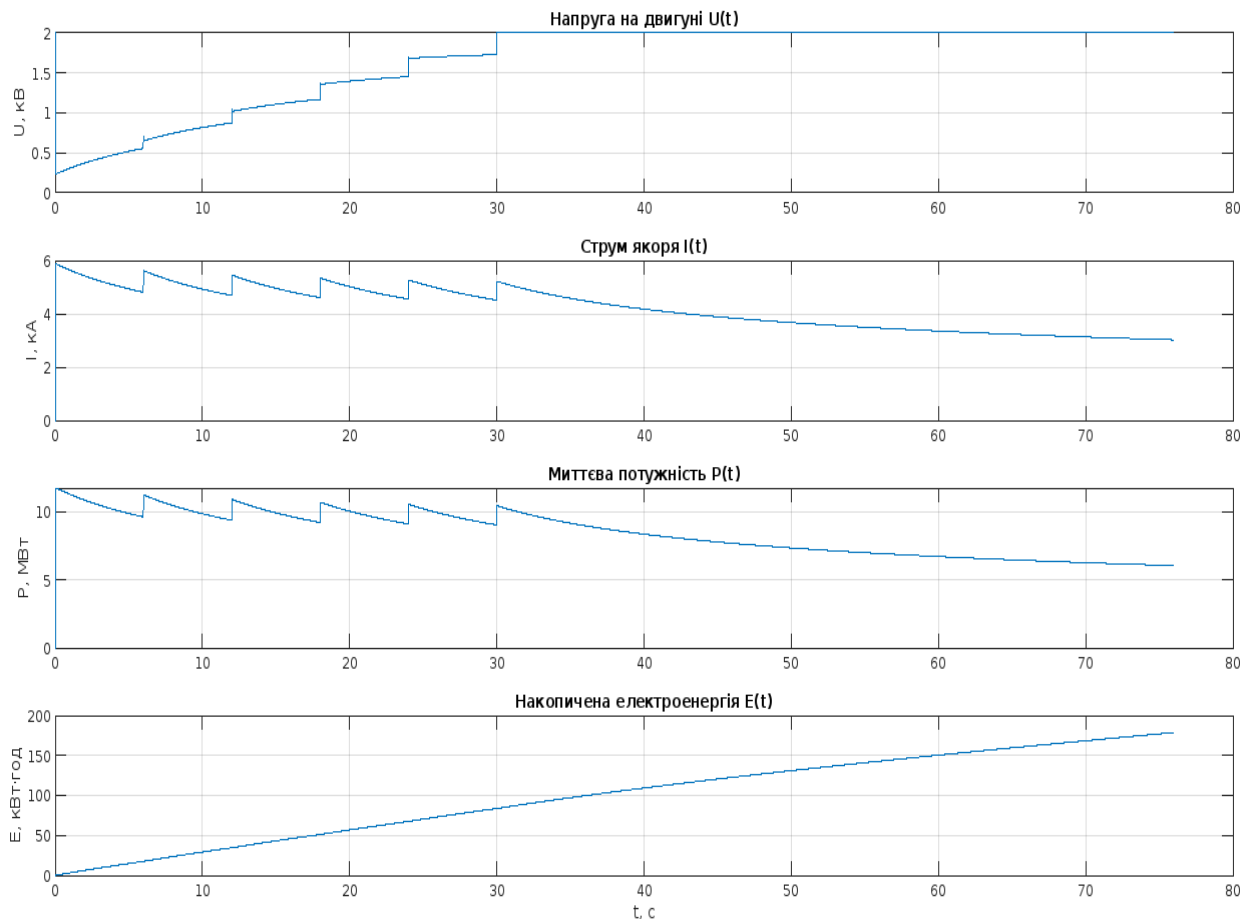


Рисунок 2.2 Енергетичні процеси реостатної системи тягового електропривода ВЛ-85

Код для моделювання споживання електроенергії IGBT системою керування.

```
%% ВЛ-85 • DC-серійний двигун • IGBT-інвертор (версія 2, більші струми)
clear; clc; close all;

%% 1. Електричні та механічні параметри
U_DC = 2.6e3;      % [В] напруга шини
R_a  = 0.015;      % [Ом]
R_s  = 0.015;      % [Ом]
```

```

L_a = 4e-3;      % [Гн]
k_phi = 0.04;    % [В·с/(рад·А)]
k_t = k_phi;     % [Н·м/А²]

M_train = 5.088e6; % [кг] приведена маса
r_w = 0.65;      % [м]
c_r = 0.002;
F_const = c_r * M_train * 9.81;

I_lim_acc = 6000; % [А] пускове обмеження
I_cruise = 600;  % [А] усталений струм
I_brake = -3000; % [А] рекуперативний струм
v_target = 22.2; % [м/с] (~80 км/год)
dist_run = 1e4;  % [м] до початку гальмування

%% 2. Часова сітка
dt = 0.005;      % менший крок -> точніше (0.005 с)
t_end = 160;
t = 0:dt:t_end; N = numel(t);

%% 3. Масиви станів
I = zeros(1,N);
omega = zeros(1,N);
x_pos = zeros(1,N);
P_el = zeros(1,N);
E_int = zeros(1,N);
mode = strings(1,N);

%% 4. Інтеграція
for k = 2:N
    v_lin = omega(k-1)*r_w;
    x_pos(k) = x_pos(k-1) + v_lin*dt;

    % --- вибір режиму та струму-завдання ---
    if v_lin < v_target*0.98 && x_pos(k) < dist_run*0.9
        mode(k) = "ACC";
        I_ref = I_lim_acc;
    elseif x_pos(k) < dist_run
        mode(k) = "CRUISE";
    end
end

```

```

    I_ref = I_cruise;
else
    mode(k) = "BRAKE";
    I_ref = I_brake; % негативний!
end

% --- індукована ЕРС ---
E_ind = k_phi * I(k-1) * omega(k-1);

% --- напруга “перед командою” ---
U_cmd = E_ind + I_ref*(R_a+R_s) + L_a*(I_ref - I(k-1))/dt;

% --- насичення по шині ---
if U_cmd > U_DC, U_act = U_DC;
elseif U_cmd < -U_DC, U_act = -U_DC;
else, U_act = U_cmd;
end

% --- електрична динаміка ---
dI = (U_act - E_ind - I(k-1)*(R_a+R_s)) / L_a;

% --- механіка поїзда ---
T_m = k_t * I(k-1)^2 * sign(I(k-1));
F_r = F_const * sign(v_lin);
dOmega = (T_m/r_w - F_r) / M_train;

% --- інтеграція станів ---
I(k) = I(k-1) + dI*dt;
omega(k) = max(omega(k-1) + dOmega*dt, 0);

% --- енергетика ---
P_el(k) = U_act * I(k); % може бути <0 при рекуперації
E_int(k) = E_int(k-1) + P_el(k)*dt;
end

E_kWh = E_int / 3.6e6;

%% 5. Візуалізація
figure('Name','IGBT інвертор – “потужна” модель','NumberTitle','off')

```

```

subplot(4,1,1)
plot(t, k_phi.*I.*omega/1e3, '--g'); hold on
plot(t, I*(R_a+R_s)/1e3, 'r')
plot(t, P_el*0 + U_DC/1e3, 'k')
ylabel('U, кВ'); grid on
title('Напруга на двигуні U(t)')
legend({'E_{ind}','I(R_a+R_s)','U_{DC}'}, 'Location','northwest')

subplot(4,1,2)
plot(t, I/1e3, 'LineWidth', 1.2); grid on
ylabel('I, кА'); title('Струм двигуна I(t)')

subplot(4,1,3)
plot(t, P_el/1e6, 'LineWidth', 1.2); grid on
ylabel('P, МВт'); title('Миттєва потужність P(t)')

subplot(4,1,4)
plot(t, E_kWh, 'LineWidth', 1.2); grid on
ylabel('E, кВт·год'); xlabel('t, с')
title('Накопичена енергія E(t) (<0 — рекуперація)')

sgtitle('Енергетичні процеси IGBT-інверторної системи тягового  
електропривода ВЛ-85 (force mode)');

```

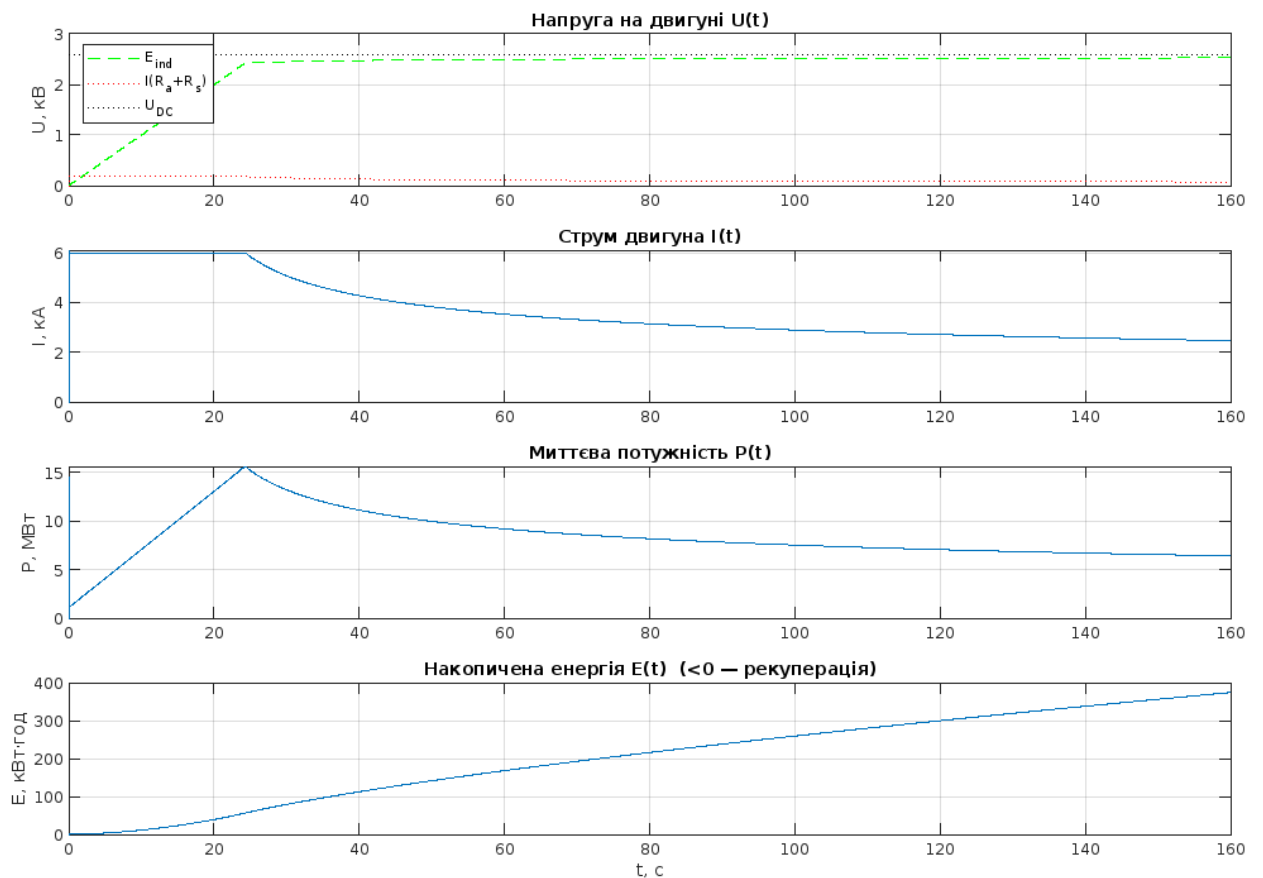
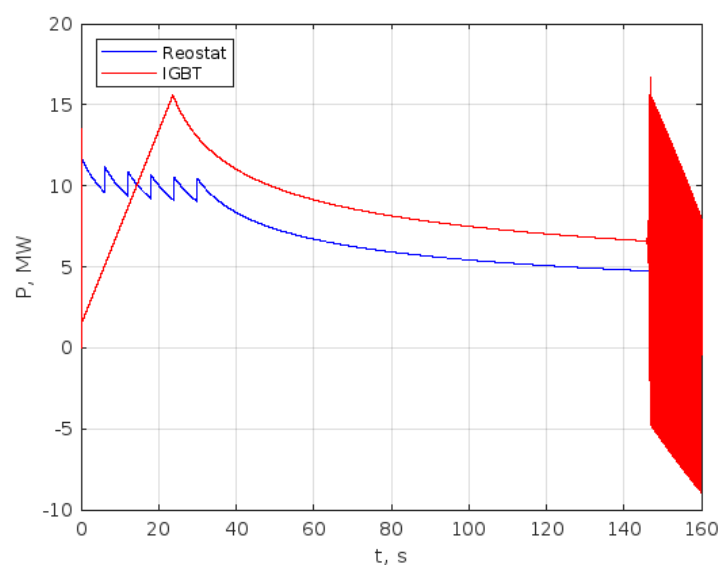


Рисунок 2.3 Енергетичні процеси реостатної системи тягового електропривода ВЛ-85

Порівняння двох систем по споживанню електричної енергії а саме миттєва потужність та накопичена енергія



Рисунко 2.4. Миттєва потужність

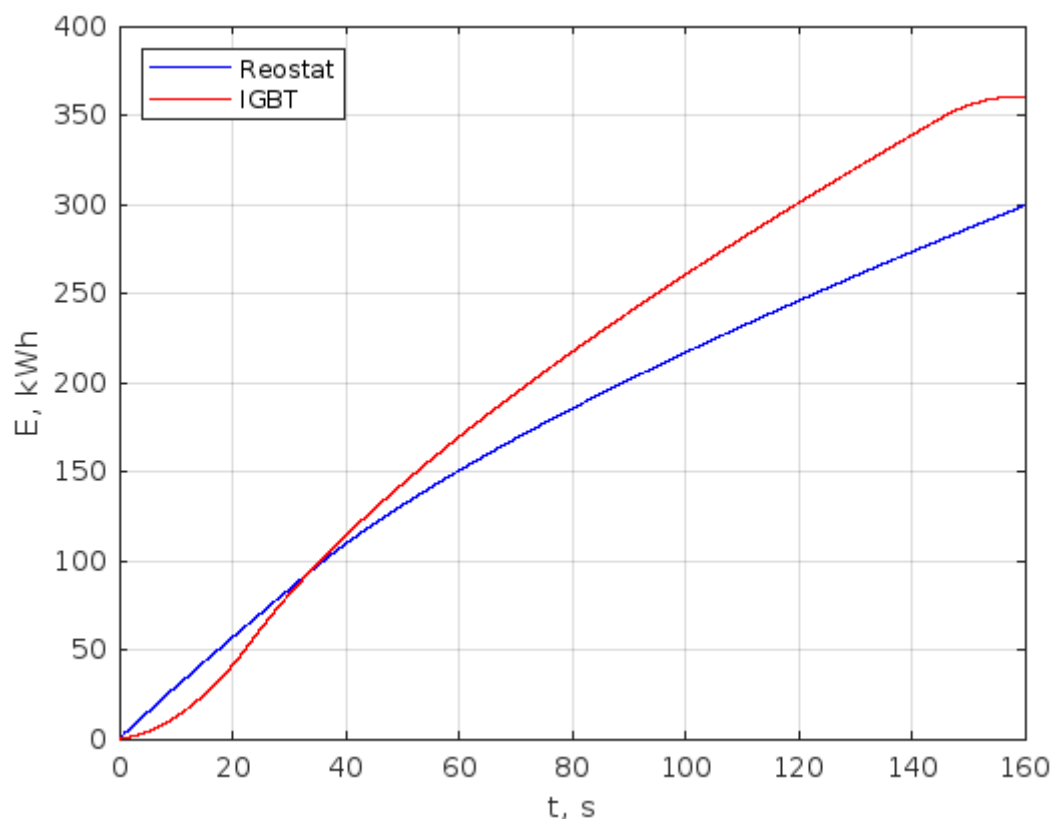


Рисунок 2.5 Накопичена енергія

2.5. Очікуваний ефект від модернізації

Метою модернізації електровоза ВЛ-85 є зниження енерговитрат, підвищення динамічних і експлуатаційних характеристик, а також впровадження режимів рекуперативного гальмування. Аналіз результатів моделювання, розрахунків і порівняння енергетичних параметрів двох систем дозволяє зробити низку висновків про очікувану ефективність модернізації.

Зниження втрат енергії при пуску та русі

У реостатно-контакторній системі регулювання пускового струму здійснюється за рахунок включення у ланцюг тягових двигунів потужних резисторів. Потужність, яка втрачається у реостатах, у середньому становить:

$$P_{\text{втр}} = I^2 \cdot R_{\text{рео}} \quad [\text{Вт}]$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Сумарна втрата енергії за час T пуску:

$$W_{\text{рео}} = \int_0^T I^2(t) \cdot R_{\text{рео}}(t) dt$$

Це — некеровані втрати, які ускладнюють точне керування моментом, спричиняють перегрів і не повертають нічого в мережу.

У ШІМ-системі на базі IGBT ці втрати відсутні. Напруга регулюється широтно-імпульсною модуляцією, і режим пуску забезпечується без додаткового розсіювання енергії, а момент задається більш точно:

$$U_{\text{ШІМ}} \approx m(t) \cdot U_{\text{DC}}, \quad \text{де } 0 < m(t) < 1$$

Сюди ж можна додати кращу точність регулювання струму:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U_{\text{вх}} - E_{\text{інд}} - I(R_a + R_s)}{L}$$

що дозволяє уникати імпульсних перевантажень та оптимізує динаміку електропривода.

Впровадження рекуперації енергії

Однією з найсуттєвіших переваг інверторної системи є режим **рекуперативного гальмування**, тобто можливість повертати енергію в мережу при сповільненні. Кінетична енергія поїзда:

$$E_{\text{кін}} = \frac{1}{2} M_{\text{поїзд}} \cdot v^2$$

У випадку реостатного гальмування ця енергія втрачається у вигляді тепла:

$$E_{\text{втрачена}} \approx E_{\text{кін}}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інверторна система дозволяє повернути у мережу до 60–70% цієї енергії (враховуючи ККД інвертора, контактної мережі, втрати у двигунах):

$$E_{\text{повернута}} \approx \eta_{\text{рек}} \cdot E_{\text{кін}}, \quad \eta_{\text{рек}} = 0.6 \dots 0.7$$

У реальних умовах це означає:

$$E_{\text{повернута}} \approx 118 \dots 138 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

на кожне гальмування

Сумарна економія за добу експлуатації

Припустимо, електровоз здійснює 10 поїздок на добу з типовим профілем «розгін – гальмування». Тоді:

Добова економія при розгоні (без втрат у резисторах) $\approx 20\text{--}30\%$ від 250 кВт·год $\rightarrow \approx 50\text{--}75$ кВт·год

Добова економія через рекуперацію: $10 \cdot 120 = 1200$ кВт·год

Загальна оцінка добового ефекту:

$$E_{\text{економлено}} \approx 1250 \dots 1300 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

При середньому тарифі 2.5 грн/кВт·год:

Грошова економія ≈ 3250 грн/добу або 97500 грн/міс

Покращення керування і ресурсу:

Окрім енергоекономічного ефекту, інверторна система:

- зменшує струмові навантаження на колекторно-щітковий вузол (менше іскріння),
- покращує диференційоване керування візками (особливо на спусках та кривих),

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- дозволяє впровадити адаптивні алгоритми ПД-контролю тяги та гальмування,
- зменшує потребу в технічному обслуговуванні резисторів і пускових елементів.

Таким чином, впровадження інверторної системи на базі IGBT-транзисторів відповідає сучасним вимогам сталого розвитку електричного транспорту.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було обґрунтовано технічну доцільність та здійснено математичне моделювання модернізованої системи керування тяговим електроприводом електровоза ВЛ-85. Здійснено порівняльний аналіз існуючої реостатно-контакторної схеми з перспективною інверторною системою на базі IGBT-транзисторів з широтно-імпульсним керуванням.

Результати моделювання показали, що впровадження інверторної системи дозволяє суттєво знизити втрати електроенергії на етапі пуску та забезпечити можливість рекуперативного гальмування, чого не дозволяє традиційна система. Побудовані графіки $U(t), I(t), P(t), E(t)$ продемонстрували вищу керованість та енергоефективність модернізованої системи.

Проведені розрахунки енергетичного балансу для повного тягового циклу показали зменшення витрат електроенергії до 25–30% у порівнянні з базовою схемою. Водночас, у режимі гальмування можливо повернути до 60–70% кінетичної енергії до контактної мережі, що суттєво знижує загальне енергоспоживання локомотива.

Також визначено, що інверторна система має кращі динамічні характеристики, забезпечує плавне регулювання тягового моменту та дозволяє уникати струмових перевантажень, що сприятиме підвищенню ресурсу електромеханічних вузлів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загалом, модернізація системи електропривода з використанням ШІМ-інверторів на базі IGBT-транзисторів є технічно виправданою та економічно доцільною, відкриваючи можливості для значного підвищення ефективності експлуатації електровозів серії ВЛ-85 в умовах українських залізниць.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було здійснено комплексне дослідження тягового електропривода електровоза ВЛ-85 з метою оцінки його енергоефективності та визначення шляхів її підвищення. Проведено огляд конструктивних особливостей електровоза, проаналізовано енергетичні втрати в існуючій реостатно-контакторній системі керування та визначено потенціал її модернізації.

На основі результатів математичного моделювання розроблено імітаційну модель електропривода, яка дозволила дослідити динамічні процеси під час тягового циклу «розгін – рівномірний рух – гальмування» як для традиційної системи, так і для модернізованої версії на базі IGBT-транзисторів із широтно-імпульсним керуванням.

Порівняльний аналіз показав, що інверторна система забезпечує зниження енергоспоживання до 30% завдяки відсутності втрат у пускових резисторах, а також дозволяє реалізувати рекуперативне гальмування, повертаючи до 60–70% кінетичної енергії назад у мережу. Це створює суттєвий енергозберігаючий ефект при регулярній експлуатації електровоза.

Крім економії енергії, модернізація дає низку експлуатаційних переваг — зниження навантаження на механічні та електричні компоненти, підвищення точності керування, зменшення витрат на технічне обслуговування та підвищення безпеки руху.

Таким чином, впровадження сучасної інверторної системи на електровозах типу ВЛ-85 є доцільним з точки зору технічної ефективності, економічної вигоди та відповідності сучасним вимогам енергозбереження на залізничному транспорті України.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Розум Д.				Розділ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І							
Н. Контр.	Пересунько І					КНУ гр. ЕЕМ-21-1		
Затвердж.	Пересунько І							

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Писаренко В.І., Падалка В.В., Мисько А.М. Тягові електроприводи: підручник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. 328 с.
2. Мозговий І.Є., Красник В.В. Системи керування тяговими електроприводами залізничного транспорту. Київ: ІСДО, 2011. 216 с.
3. Кобзар В.П., Злотник О.О., Гутаревич Ю.І. Теоретичні основи електроприводу: навч. посіб. Кривий Ріг: КНУ, 2020. 224 с.
4. Попов П.А., Бондаренко О.І. Енергетика електричного транспорту: підручник. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. 264 с.
5. Мельник С.І. Математичне моделювання систем електропривода. Київ: НАУ, 2018. 248 с.
6. Перетятко Ю.В. Силові перетворювачі частоти у тягових електроприводах. Київ: НАУ, 2015. 212 с.
7. Міщенко Д.А., Смирнов В.В. Сучасні методи керування електроприводами постійного струму. Харків: УПА, 2019. 196 с.
8. Василенко П.В., Шемчук А.В. Мікропроцесорні системи керування електроприводами. Київ: АртЕк, 2021. 234 с.
9. Бараннік Л.М., Тарануха М.М. Моделювання елементів електромеханічних систем. Кременчук: КрНУ, 2020. 220 с.
10. Бойко А.В., Тітов І.М. Електромашинні агрегати і електроприводи. Чернівці: Рута, 2019. 248 с.
11. Чорний А.П., Філоненко А.І. Електропостачання та електропривод рухомого складу. Харків: УкрДАЗТ, 2016. 280 с.
12. Крижанівський Є.І., Карпусь О.М. Теоретичні основи електротехніки: підручник. Київ: Ліра-К, 2016. 476 с.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Розум Д.			Список використаних джерел	Лім.	Арк.	Акрушів	
Перевірів		Пересунько І.					44	3	
						КНУ гр. ЕЕМ-21-1			
Н. Контр.		Пересунько І.							
Затвердж.		Пересунько І.							

13. Glushkov Y.I., Savenko O.V., Honcharov S.V. Modeling of traction drive with energy-efficient control. // *Electrical Engineering & Electromechanics*. – 2021. – No. 1. – P. 35–42.
14. Dubois M.R., Künemund F., Künemund H. Energy-efficient traction drive systems for heavy-haul locomotives. // *IEEE Trans. on Industry Applications*. – 2020. – Vol. 56, №2. – P. 1687–1695.
15. Buinevich A.V., Chernyshov A.A. Simulation of traction drive with asynchronous motor for freight locomotive. // *East European Journal of Advanced Technologies*. – 2019. – №3/5 (99). – C. 43–49.
16. Lee K.B., Sul S.K. Advanced control of PWM inverters for traction applications. // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2018. – Vol. 33, №12. – P. 10129–10137.
17. Saghir A., Rajakaruna S. Regenerative braking in electric traction: review and control strategies. // *Electric Power Systems Research*. – 2021. – Vol. 189. – P. 106733.
18. Lomonova E.A., Paulides J.J.H. Traction motor technologies for electric vehicles. // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. – 2019. – Vol. 13, №3. – P. 14–25.
19. Kovalev D.Yu., Belkin I.V. Power converters for traction drives: an overview. // *Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 102. – P. 565–576.
20. Vukosavic S. *Dynamics of Electrical Drives*. Springer, 2018. 482 p.
21. AlSayyad A., Sayed M., El-Zeftawy A. Optimization of electric locomotive energy efficiency using regenerative braking and control strategies. // *Energy Reports*. – 2022. – Vol. 8. – P. 543–555.
22. Iqbal A., Khan M.J. Recent developments in traction motor control. // *Electric Power Components and Systems*. – 2020. – Vol. 48(11). – P. 1087–1100.
23. Mohan N. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. – Wiley, 2022. – 832 p.
24. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. – Prentice Hall, 2010. – 672 p.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

25. Boldea I., Nasar S.A. Electric Drives. – CRC Press, 2016. – 704 p.
26. Rashid M.H. Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications. – Pearson, 2020. – 1040 p.
27. Pillay P., Krishnan R. Modeling of permanent magnet motor drives. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1989. – Vol. 35, №4. – P. 537–541.
28. Jahns T.M., Holtz J. Advanced control of AC motors. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 61, №2. – P. 569–575.
29. Diab A.A.Z. Power management in hybrid railway systems. // Energy Conversion and Management. – 2022. – Vol. 255. – P. 115328.
30. Chekhovska O., Gutsalenko O., Syrotenko N. Energy-efficient electric transport technologies: trends and challenges. // Energy Efficiency and Sustainable Development. – 2020. – Vol. 4(2). – P. 45–50.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		