

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:

**Силові схеми частотно-регульованого тягового електроприводу
електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами**

Виконав: студент групи ЗЕЕМ-22

Микита ДИВЕНКО

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. Ігор 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

ДИВЕНКО Микита Євгенович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Силові схеми частотно-регульованого тягового електроприводу
електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є модернізація силової
схеми частотно-регульованого тягового електроприводу електрорухомого
складу постійного струму з асинхронними двигунами
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Аналіз силових схем частотно-регульованого електроприводу
електрорухомого складу постійного струму; II. Силові схеми частотно-
регульованого тягового електроприводу електрорухомого складу постійного
струму з асинхронними двигунами; III. Розробка системи керування
частотно-регульованим тяговим електроприводом електрорухомого складу
постійного струму з асинхронними двигунами.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Структура тягової електропередачі з асинхронними двигунами;
II. Силова схема БЕМС; III. . Схеми комутаторів інверторів напруги на IGBT.

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Вимоги та структура тягової асинхронної електропередачі	21.05.26
2	Основні функції схеми частотно-регульованого тягового електроприводу	27.05.26
3	Структура силової частини частотно-регульованого тягового електроприводу	02.06.26
4	Класичний варіант системи керування	11.06.26
5	Вибір способів комутації силових ключів	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Микита ДИВЕНКО
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Силові схеми частотно-регульованого тягового електроприводу електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами»

37 с., 6 рис., 30 літературних джерел

Мета роботи: Підвищення енергетичної та експлуатаційної ефективності тягового електрорухомого складу постійного струму шляхом дослідження, оптимізації та розробки раціональних топологій силових кіл частотно-регульованого електроприводу на базі асинхронних тягових двигунів та транзисторних перетворювачів, а також провести аналіз, обґрунтування та синтез топологій силових кіл перетворювачів частоти для тягового рухомого складу (електровозів та електропоїздів), що живиться від контактної мережі постійного струму, з метою забезпечення високоефективного керування асинхронними тяговими двигунами у режимах тяги та гальмування.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Здійснити ретроспективний та сучасний аналіз еволюції силових схем тягового електроприводу рухомого складу постійного струму (магістральних електровозів, електропоїздів, міського транспорту).

Проаналізувати структурну побудову силового ланцюга від струмоприймача до тягового двигуна, враховуючи специфіку живлення постійним струмом (відсутність головного трансформатора та мережевого випрямляча).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розробити математичні моделі взаємодії ключових елементів силового ланцюга: "контактна мережа – вхідний LC-фільтр – автономний інвертор напруги (АІН) – асинхронний тяговий двигун (АТД)".

Дослідити параметри та функції вхідного мережевого (LC) фільтра, який забезпечує згладжування пульсацій напруги, захист інвертора від атмосферних і комутаційних перенапруг контактної мережі, а також локалізацію вищих гармонік, що генеруються інвертором.

Дослідити вплив коливань напруги в тяговій мережі на стійкість роботи частотно-регульованого приводу та алгоритми векторного керування.

Обґрунтувати вибір топології автономного інвертора напруги (АІН). Для мереж 3 кВ постійного струму порівняти використання дворівневих інверторів на базі високовольтних IGBT-модулів (класу 6,5 кВ) та трирівневих інверторів із фіксацією нульової точки (NPC), що дозволяють використовувати транзистори нижчого класу напруги.

Проаналізувати режими електричного гальмування (рекуперативного та реостатного) і синтезувати структуру гальмівних чоперів для забезпечення максимального повернення енергії.

Спроекувати контур гальмівного переривача (чопера) та гальмівного резистора для реалізації реостатного гальмування у випадках, коли тягова підстанція або контактна мережа не здатні прийняти енергію рекуперації.

Провести оцінювання комутаційних втрат і електромагнітної сумісності (ЕМС) різних варіантів побудови перетворювачів (на базі IGBT- та SiC-модулів).

Розробити систему захисту силової схеми від струмів короткого замикання (за допомогою швидкодіючих вимикачів) та динамічних перевантажень.

ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД, ЕЛЕКТРОРУХОМИЙ СКЛАД ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, АВТОНОМНИЙ ІНВЕРТОР НАПРУГИ,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

АСИНХРОННИЙ ТЯГОВИЙ ДВИГУН, ЛАНКА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ,
ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, LC-ФІЛЬТР, IGBT-МОДУЛЬ,
ГАЛЬМІВНИЙ ЧОПЕР, СИЛОВА СХЕМА

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	9
Розділ 1. Аналіз силових схем частотно-регульованого електроприводу електрорухомого складу постійного струму	17
1.1. Вимоги до структури тягової асинхронної електропередачі з асинхронними двигунами.....	17
1.2. Структура тягової електропередачі з асинхронними двигунами.....	18
Розділ 2. Силові схеми частотно-регульованого тягового електроприводу електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами.....	19
2.1. Основні функції схеми частотно-регульованого тягового електроприводу електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами.....	19
2.2. Структура силових частин частотно-регульованого тягового електроприводу електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами.....	21
Розділ 3. Розробка системи керування частотно-регульованим тяговим електроприводом електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами.....	25
3.1. Класичний варіант системи керування частотно-регульованим тяговим електроприводом електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами.....	25
3.2. Вибір способів комутації силових ключів системи керування частотно- регульованим тяговим електроприводом електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами	28
Висновки	29
Список використаних джерел	31

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Додаток А.....	35
Додаток Б	36
Додаток В.....	37

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Проблематика традиційного приводу на постійному струмі

Історично склалося так, що на залізницях, електрифікованих на постійному струмі (наприклад, із номінальною напругою 3 кВ для магістральних ліній або 600-750 В для міського транспорту), використовувалися тягові електродвигуни постійного струму послідовного збудження.

Керування ними здійснювалося за допомогою реостатно-контакторних систем.

Цей підхід супроводжувався колосальними втратами електроенергії на нагрівання пускових резисторів, низькою надійністю колекторно-щіткового вузла двигунів та високими витратами на технічне обслуговування.

Перехід до тяги змінного струму: структурні зміни

Впровадження асинхронних тягових двигунів (АТД) з короткозамкненим ротором стало справжньою революцією. АТД є надзвичайно надійними, компактними та мають жорсткі тягові характеристики.

Однак для їх живлення від мережі постійного струму потрібне встановлення на борту локомотива складного силового електронного комплексу — частотно-регульованого приводу.

Особливістю рухомого складу постійного струму є те, що контактна мережа безпосередньо (без проміжного трансформатора) підключається до тягового перетворювача.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Базова силова схема такого електроприводу складається з трьох ключових блоків:

1. Вхідний LC-фільтр (ланка постійного струму). Складається з потужного лінійного дроселя (реактора) та батареї конденсаторів. Його головна функція — підтримка стабільного рівня напруги на вході інвертора (навіть при просіданнях напруги в контактній мережі) та ізоляція тягової підстанції від високочастотних завад, що генеруються під час широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

2. Автономний інвертор напруги (АІН). Це серце системи. Він перетворює постійну напругу на трифазну змінну напругу регульованої частоти і амплітуди. Сучасні інвертори будуються виключно на базі IGBT (біполярних транзисторів з ізольованим затвором) або новітніх SiC (карбід-кремнієвих) модулів.

3. Гальмівний контур. Електродинамічне гальмування асинхронним двигуном є надзвичайно ефективним (двигун переводиться в генераторний режим). Проте мережа постійного струму не завжди "сприйнятлива" до енергії рекуперації (якщо поруч немає іншого поїзда, що споживає енергію). Тому силова схема обов'язково включає гальмівний переривач (чопер), який в автоматичному режимі імпульсно скидає надлишок генерованої енергії на гальмівні резистори, запобігаючи небезпечному зростанню напруги в конденсаторах фільтра.

Виклики проектування: проблема високої напруги

Найбільшим інженерним викликом для систем 3 кВ постійного струму є рівень робочої напруги. Напруга в мережі може коливатися від 2,2 кВ до 4 кВ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Стандартна дворівнева схема інвертора (шість ключів) вимагає використання надзвичайно дорогих транзисторів класу 6,5 кВ, які мають значні динамічні втрати при комутації.

Тому актуальною науково-практичною задачею є застосування трирівневих силових схем (зокрема, топології Neutral-Point-Clamped — інверторів із діодною фіксацією нульової точки).

Така схема дозволяє використовувати стандартні транзистори класу 3,3 кВ, оскільки напруга розподіляється між двома послідовно з'єднаними ключами.

Крім того, трирівневий інвертор формує напругу, що за формою значно ближче до ідеальної синусоїди, що радикально знижує гармонійні втрати у двигуні та рівень акустичного шуму.

Практичне значення

Оптимізація силових схем частотно-регульованого приводу для мереж постійного струму дозволяє створювати нове покоління магістральних електровозів та швидкісних електропоїздів, які гарантують економію електроенергії до 20-30% за рахунок ефективного керування та глибокої рекуперації, а також забезпечують максимальне використання коефіцієнта зчеплення коліс із рейками.

Технологічний перехід на залізничному транспорті

Історично електрифікація залізниць та систем міського транспорту розпочиналася з використання постійного струму (номінальні напруги **3 кВ, 1,5 кВ, 600–750 В**).

Тривалий час єдиним технічно можливим рішенням для таких систем було застосування колекторних тягових двигунів постійного струму з реостатно-контакторними системами керування (РКСК).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Проте наявність щітково-колекторного вузла різко обмежувала потужність двигуна, знижувала його надійність та вимагала постійного технічного обслуговування.

Крім того, реостатний пуск супроводжувався значними втратами електроенергії (до **15-20%** від спожитої за цикл руху).

Бурхливий розвиток силової електроніки, зокрема поява потужних біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT) та мікропроцесорних систем керування, дозволив здійснити революційний перехід до безколекторного тягового приводу.

Сьогодні стандартом де-факто є використання трифазних асинхронних тягових двигунів (АТД) з короткозамкненим ротором, живлення яких здійснюється від автономних інверторів напруги (АІН).

Структура силової схеми ЕРС постійного струму

Побудова силової схеми рухомого складу постійного струму з АТД має суттєві відмінності від систем змінного струму (де присутній тяговий трансформатор та випрямляч).

Класична топологія для мережі постійного струму містить такі базові компоненти:

- **Струмоприймач та швидкодіючий вимикач:** для зняття напруги з контактного проводу та захисту обладнання від струмів короткого замикання.
- **Вхідний LC-фільтр:** складається з лінійного дроселя та батареї конденсаторів. Його функція подвійна: згладжування пульсацій напруги контактної мережі та запобігання проникненню височастотних гармонік від роботи інвертора назад у тягову мережу (забезпечення електромагнітної сумісності із пристроями сигналізації).

- **Автономний інвертор напруги (АІН):** перетворює постійну напругу ланки (напругу на конденсаторі) у трифазну змінну напругу з регульованою частотою та амплітудою для живлення АТД. Формування вихідної напруги здійснюється за алгоритмами векторної широтно-імпульсної модуляції (SVPWM).
- **Гальмівний переривач (чопер) та гальмівний резистор:** підключаються паралельно до конденсатора. Оскільки мережа постійного струму не завжди здатна прийняти енергію рекуперації, надлишок напруги в ланці постійного струму "скидається" на резистор для забезпечення надійного гальмування.

Математичні аспекти та проблеми регулювання

Впровадження АТД вимагає складних алгоритмів керування, найпоширенішим з яких є векторне керування з орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора.

Електромагнітний момент двигуна у синхронно обертовій системі координат (осі d-q) виражається дуже просто.

Головною проблемою експлуатації таких схем на лініях постійного струму (особливо **3 кВ**) є жорстка прив'язка вхідної напруги інвертора до напруги контактної мережі, яка може коливатися в широких межах (від **2,2 кВ** до **4,0 кВ**).

Максимальна амплітуда фазної напруги статора, яку може сформувати інвертор без переходу в режим перемодуляції, обмежена граничним значенням.

Зниження напруги призводить до передчасного виходу приводу в зону ослаблення магнітного поля ротора, що обмежує максимальну силу тяги на високих швидкостях.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Для вирішення цієї проблеми у сучасних силових схемах іноді застосовують додаткові входні підвищувальні DC-DC перетворювачі, які стабілізують напругу на вході АІН незалежно від просадок у контактній мережі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняльний аналіз тягових систем

Характеристи ка	Традиційна система (Двигун ПС + РКСК)	Сучасна система (АТД + АІН)
Регулювання швидкості	Ступінчасте (втрати в реостатах)	Плавне, безступінчасте (без втрат)
Коефіцієнт зчеплення	Низький (через жорстку характеристику та схильність до боксування)	Максимально можливий (точно індивідуальне керування моментом)
Масо- габаритні показники двигуна	Високі (через колекторний вузол)	Знижені на 20- 30% при тій самій потужності
Обслуговуван ня	Високі витрати (заміна щіток, проточка колектора)	Мінімальні (двигун практично не потребує обслуговування)
Стійкість до коливань напруги	Висока (пряме підключення)	Потребує складного захисту від перенапруг

Практичне значення досліджень

Дослідження та удосконалення силових схем частотно-регульованого електроприводу є ключовим напрямком модернізації вітчизняного залізничного транспорту.

Це дозволяє створювати нове покоління електропоїздів та локомотивів постійного струму, які споживають на **20-25%** менше електроенергії, забезпечують високу надійність в умовах інтенсивного руху та знижують вартість життєвого циклу техніки, що відповідає кращим європейським та світовим стандартам.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Аналіз силових схем частотно-регульованого електроприводу електрорухомого складу постійного струму

1.1. Вимоги до структури тягової асинхронної електропередачі з асинхронними двигунами

Аналіз силових схем частотно-регульованого електроприводу електрорухомого складу постійного струму (електровозів, електропоїздів, метропоїздів) з асинхронними двигунами [9, 38–41] дозволяє сформулювати вимоги до структури тягової асинхронної електропередачі з асинхронними двигунами, а саме — обов’язкову наявність:

- блоку електромагнітної сумісності (БЕМС), що забезпечує функціональну та режимну сумісність тягової електропередачі з тяговою мережею метрополітену;
- перетворювально-регулювального блоку (ПРБ), який здійснює перетворення постійної напруги тягової мережі у змінну напругу, регульовану за величиною та частотою, фазність якої відповідає фазності асинхронних тягових двигунів;
- електромеханічного блоку (ЕМБ), що забезпечує перетворення електричної енергії змінного струму, яка надходить із ПРБ, у механічну енергію обертання вала асинхронних тягових двигунів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1	Літ.	Лист	Листів
Розробив	Дивенко М.Є.						17	2
Перевірив	Сінчук І.О.							
Реценз.								
Н. Контр.	Сінчук І.О.							
Затвердив	Пересунько І.І.				КНУ ЗЕЕМ-22			

1.2. Структура тягової електропередачі з асинхронними двигунами

Перелічені вимоги до тягової асинхронної електропередачі з урахуванням функціонального призначення її блоків дозволяють представити структуру такої електропередачі у вигляді послідовного з'єднання блоків БЕМС, ПРБ, ЕМБ, до входу яких підключається тягова мережа з напругою живлення U_c , а виходом є ротори чотирьох асинхронних тягових двигунів з однаковою круговою частотою обертання.

$$1\omega_p = 2\omega_p = 3\omega_p = 4\omega_p = \omega_p \text{ (рис. 1.1) [22].}$$

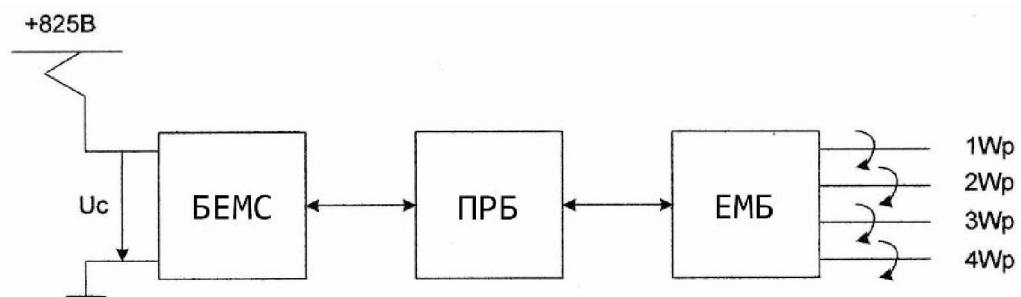


Рис. 1.1. Структура тягової електропередачі з асинхронними двигунами

Розділ 2. Силові схеми частотно-регульованого тягового електроприводу електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами

2.1. Основні функції схеми частотно-регульованого тягового електроприводу електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами

Основними функціями БЕМС є:

- надання контактній мережі, як джерелу живлення ПРБ, властивостей джерела напруги [7];
- обмеження пульсацій тягового струму в контактній мережі до допустимого рівня, що забезпечує нормальну роботу АРС метрополітену [11];
- обмеження комутаційних мережевих перенапруг до допустимого рівня, який забезпечує необхідну вентильну та ізоляційну міцність електрообладнання [11];
- обмеження перенапруг на вході ПРБ, зумовлених коливальним процесом заряду фільтрового конденсатора при підключенні схеми до тягової мережі та при повторних дотиках струмоприймача до контактної рейки після відриву [20];
- забезпечення безперервності режиму електричного гальмування метровагона за відсутності як напруги, так і споживачів у тяговій мережі, а також під час відривів струмоприймача від контактної рейки або наїзду на ізоляційні проміжки в контактній рейці [11];

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 2			Літ.	Лист	Листів	
Розробив	Дивенко М.Є.										
Перевірів	Сінчук І.О.									19	6
Реценз.								КНУ ЗЕЕМ-22			
Н. Контр.	Сінчук І.О.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

- захист керованих силових напівпровідникових приладів ПРБ від розрядного струму фільтрового конденсатора [9];
- захист тягової електропередачі при коротких замиканнях у її силовій схемі [21].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Структура силовій частини частотно-регульованого тягового електроприводу електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами

Перелічені функції реалізовано в силовій схемі БЕМС, наведеної на рис. 2.1.

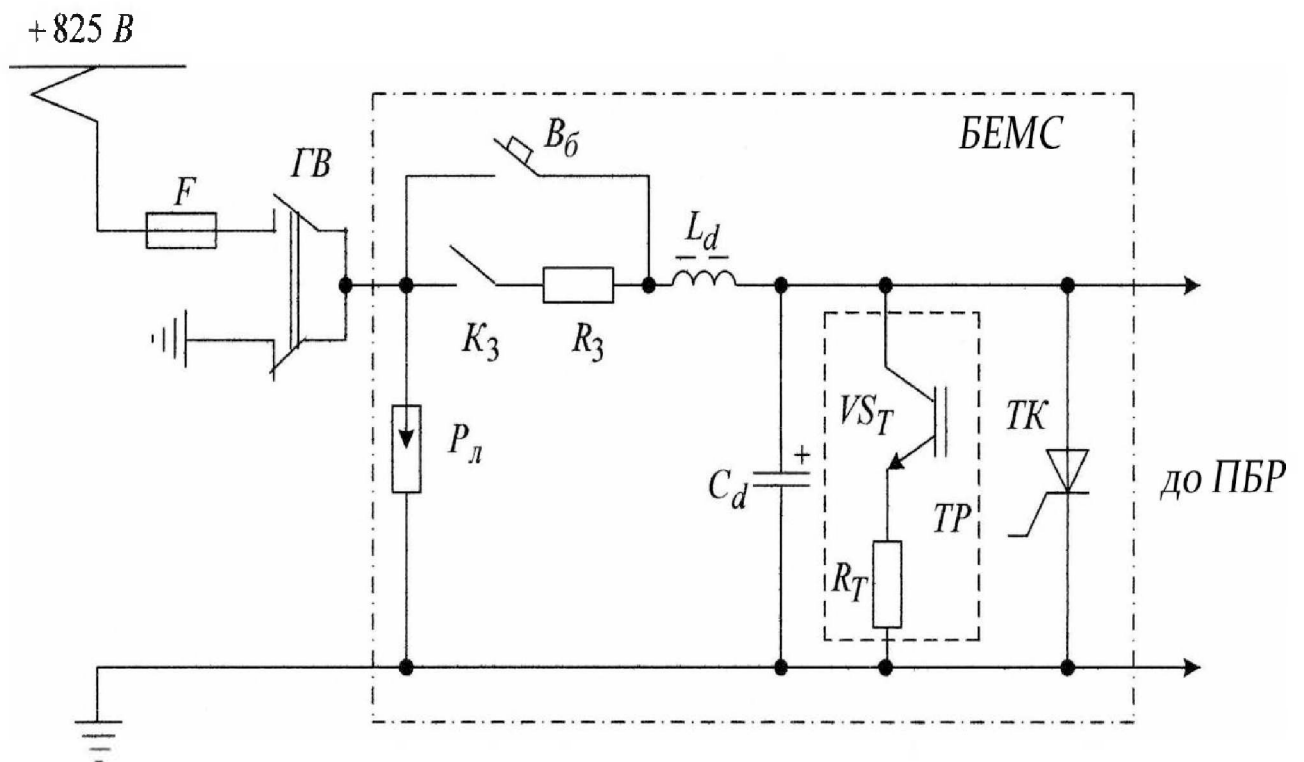


Рис. 2.1. Силова схема БЕМС при використанні традиційних підходів до забезпечення основних її функцій

Конденсатор C_d надає контактній мережі властивостей джерела напруги відносно ПРБ.

Оскільки ємність цього конденсатора є скінченною, напруга на ньому має пульсаційну складову через імпульсний характер роботи ПРБ.

Пульсаційна складова зумовлює пульсації тягового струму в контактній мережі.

Реактор L_d обмежує пульсації тягового струму в контактній мережі, що виникають унаслідок пульсацій напруги на конденсаторі C_d .

Із технічних міркувань величина індуктивності реактора L_d приймається скінченною, тому в тягову мережу потрапляють пульсаційні складові тягового струму, величина яких повинна бути обмежена до допустимого рівня.

Лінійний розрядник R_L забезпечує обмеження комутаційних мережових перенапруг на вході тягової електропередачі.

Залишкова напруга на ньому є тією величиною, на яку мають розраховуватись вентильна міцність напівпровідникових приладів і ізоляційна міцність електрообладнання в тяговій електропередачі.

Як розрядники доцільно використовувати конструкції на основі металооксидних резисторів у силіконовому корпусі, здатних витримувати перенапруги великої тривалості та характеризуються високими масо-габаритними показниками.

Наприклад, обмежувачі перенапруг типу *Polim HND-1,0* із залишковою напругою 2,7 кВ при струмі 10 кА [22].

Резистор R_3 і контактор K_3 (зарядне коло) забезпечують аперіодичний процес заряду конденсатора C_d під час підключення схеми до контактної мережі.

Після завершення заряду конденсатора C_d , тривалість якого не перевищує 1 секунди, силові кола тягової електропередачі стають

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

підготовленими до роботи, що дозволяє ввімкнути швидкодіючий автоматичний вимикач B_6 і, таким чином, зашунтувати зарядний резистор R_3 [11].

З огляду на відносно низьку швидкодію вимикача B_6 і необхідність його частих комутацій під напругою, використання цього способу демпфування коливальних процесів заряду конденсатора C_d під час повторних, після відриву, дотиків струмоприймача до контактної рейки є небажаним.

Гальмівний регулятор ТР, що базується на ключі VS_T і резисторі R_T , забезпечує безперервний перехід на кероване електродинамічне гальмування у випадку неможливості виконання рекуперативного гальмування.

Його наявність у схемі є обов'язковою з огляду на вимоги безпеки руху [11].

Тиристорний короткозамикач ТК забезпечує захист керованих силових напівпровідникових приладів ПРБ від струму розряду конденсатора C_d шляхом створення обвідного шунтувального кола з лінійним опором.

Його наявність є обов'язковою під час побудови ПРБ на модулях *IGBT*, транзистори яких є чутливими до струмових перевантажень.

Швидкодіючий вимикач B_6 забезпечує захист тягового електрообладнання від пошкоджень у разі коротких замикань у силовому колі або замикань на землю.

Відключення тягової електропередачі від контактної мережі здійснюється через 1–2 мс після того, як аварійний струм досягає уставленого значення [21].

Сучасні силові схеми ПРБ двофазних і трифазних тягових асинхронних електропередач будуються на основі класичних дворівневих інверторів напруги з синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(ШІМ) з використанням двоквADRантних ключів змінного струму на базі модулів IGBT [12].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 3. Розробка системи керування частотно-регульованим тяговим електроприводом електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами

3.1. Класичний варіант системи керування частотно-регульованим тяговим електроприводом електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами

Безснабберний класичний варіант комутаторів інверторів напруги з ШІМ на базі IGBT, попри позитивний чинник — схемну простоту комутаторів [12], має при використанні традиційної неоднорідної комутації поряд із підвищеними втратами від прямого струму в лінійних транзисторах ще два негативні фактори:

По-перше, в силових транзисторах ключів виникають комутаційні втрати енергії під час їх вмикання та вимикання через наявність на них прямої напруги [18] у процесі наростання і спаду прямого струму до нуля.

По-друге, в схемі існують сквозні струми, обмеження яких вимагає керованого по базі процесу вмикання силових транзисторів ключів.

Це, як відомо [23], призводить до додаткових комутаційних втрат енергії під час увімкнення (включення) через необхідність формування активного режиму роботи транзистора на інтервалі часу відновлення блокувальних (запірних) властивостей зворотних діодів ключів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 3	Літ.	Лист	Листів
Розробив	Дивенко М.Є.						25	4
Перевірів	Сінчук І.О.							
Реценз.								
Н. Контр.	Сінчук І.О.							
Затвердив	Пересунько І.І.				КНУ ЗЕЕМ-22			

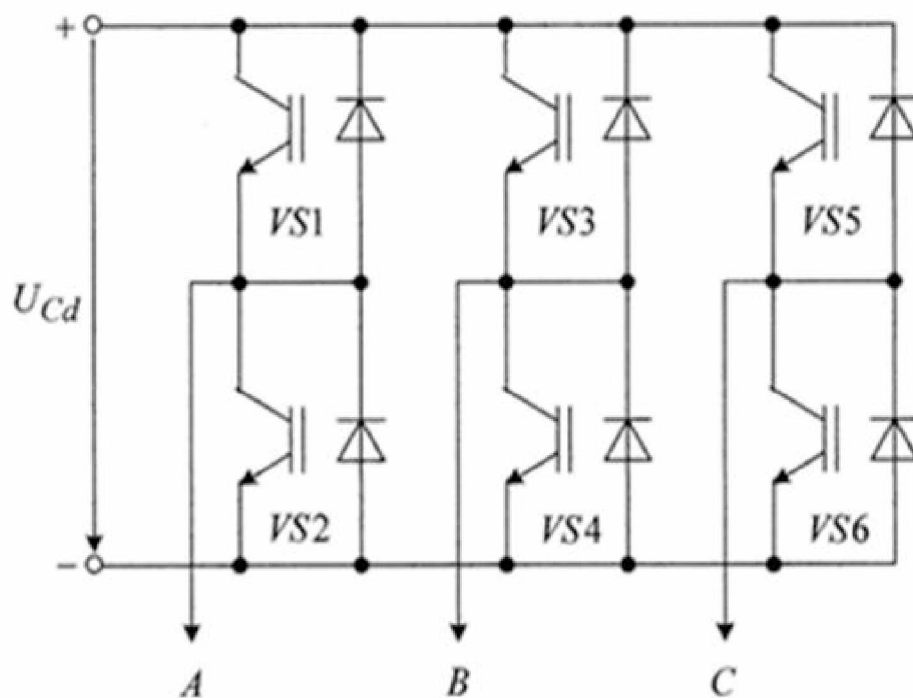


Рис. 3.1. Схеми комутаторів інверторів напруги на IGBT.

Оскільки комутаційні втрати зростають із підвищенням частоти перемикання, це стає обмежувальним фактором як підвищення робочої частоти ШІМ, так і підвищення струмів силових ключів на базі IGBT.

Так, для модулів IGBT на робочу напругу 1,7 кВ і струм 2,4 кА стандартна частота перемикань, при збереженні прийнятного струмового навантаження, становить лише 1500 Гц [15].

Розглянемо більш детально роботу ключа на базі IGBT у мостових комутаційних структурах з індуктивним навантаженням під час комутації його силового транзистора, використовуючи теоретичні положення робіт [24, 25] щодо базових комутаційних структур.

Під комутацією ключів будемо розуміти процес зміни їхньої миттєвої провідності $g = i/u$ між крайніми значеннями нуль і нескінченність, внаслідок чого він переходить від вимкненого до ввімкненого стану або навпаки.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Вибір способів комутації силових ключів системи керування частотно-регульованим тяговим електроприводом електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами

При використанні транзисторів як силових напівпровідникових приладів ключів комутаторів тягових інверторів напруги з традиційною неоднорідною комутацією обмежується як швидкість наростання струму при увімкненні, так і швидкість спаду струму при вимкненні шляхом зниження швидкості наростання та спаду керуючого сигналу відповідно.

Цей спосіб є найпростішим, однак він значно підвищує комутаційні втрати енергії.

На практиці фірми-розробники силових високовольтних модулів IGBT рекомендують обмежувати швидкість наростання за рахунок керуючого сигналу, а компенсувати негативну дію швидкості спаду конструктивними методами, спрямованими на зниження паразитних індуктивностей контурів комутації.

Формальною ознакою традиційної неоднорідної примусової комутації керованих напівпровідникових приладів є збіг знаків напруги і струму ліворуч та праворуч від точки комутації [24].

Можливість керованих напівпровідникових приладів працювати в режимі примусової комутації обмежена тепловиділеннями в приладі.

Тому, реально у тягових перетворювачах примусову комутацію IGBT-ключів можна використовувати при частотах ШІМ, що не перевищують 1000 Гц, а при більших частотах потрібно переходити до природної (однорідної) комутації [26].

Висновки

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

Здійснити ретроспективний та сучасний аналіз еволюції силових схем тягового електроприводу рухомого складу постійного струму (магістральних електровозів, електропоїздів, міського транспорту).

Проаналізувати структурну побудову силового ланцюга від струмоприймача до тягового двигуна, враховуючи специфіку живлення постійним струмом (відсутність головного трансформатора та мережевого випрямляча).

Розробити математичні моделі взаємодії ключових елементів силового ланцюга: "контактна мережа – вхідний LC-фільтр – автономний інвертор напруги (АІН) – асинхронний тяговий двигун (АТД)".

Дослідити параметри та функції вхідного мережевого (LC) фільтра, який забезпечує згладжування пульсацій напруги, захист інвертора від атмосферних і комутаційних перенапруг контактної мережі, а також локалізацію вищих гармонік, що генеруються інвертором.

Дослідити вплив коливань напруги в тяговій мережі на стійкість роботи частотно-регульованого приводу та алгоритми векторного керування.

Обґрунтувати вибір топології автономного інвертора напруги (АІН). Для мереж 3 кВ постійного струму порівняти використання дворівневих інверторів на базі високовольтних IGBT-модулів (класу 6,5 кВ) та трирівневих інверторів із фіксацією нульової точки (NPC), що дозволяють використовувати транзистори нижчого класу напруги.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проаналізувати режими електричного гальмування (рекуперативного та реостатного) і синтезувати структуру гальмівних чоперів для забезпечення максимального повернення енергії.

Спроекувати контур гальмівного переривача (чопера) та гальмівного резистора для реалізації реостатного гальмування у випадках, коли тягова підстанція або контактна мережа не здатні прийняти енергію рекуперації.

Провести оцінювання комутаційних втрат і електромагнітної сумісності (ЕМС) різних варіантів побудови перетворювачів (на базі IGBT- та SiC-модулів).

Розробити систему захисту силової схеми від струмів короткого замикання (за допомогою швидкодіючих вимикачів) та динамічних перевантажень.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
						30
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. Bose, B. K. (2006). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Academic Press.
3. Kondo, K. (2010). Recent trend and future prospects of traction drives. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 5(4), 411-416.
4. Leonhard, W. (2001). Control of Electrical Drives (3rd ed.). Springer.
5. Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., & Blaabjerg, F. (2002). Control in Power Electronics: Selected Problems. Academic Press.
6. Brenna, M., Foiadelli, F., & Zaninelli, D. (2018). Electrical Railway Transportation Systems. IEEE Press/Wiley.
7. Trzynadlowski, A. M. (2001). Control of Induction Motors. Academic Press.
8. Holmes, D. G., & Lipo, T. A. (2003). Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. IEEE Press/Wiley.
9. Zinoviev, G. S. (2010). Fundamentals of Power Electronics. NSTU.
10. 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.
11. Bollen, M. H. J., & Gu, I. Y. H. (2006). Signal Processing of Power Quality Disturbances. IEEE Press/Wiley.

12. Carpita, M., Marcheko, G., Pinceti, P., & Rotondale, N. (2008). DC transportation systems and active filters: A review. Proceedings of the 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC), 2374-2379.

13. Ogasa, M. (2010). Energy saving and environmental measures in railway technologies: Example with hybrid traction systems. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 5(1), 15-20.

14. Liserre, M., Blaabjerg, F., & Hansen, S. (2005). Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier. IEEE Transactions on Industry Applications, 41(5), 1281-1289.

15. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). (2017). EN 50121-3-2: Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-2: Rolling stock - Apparatus.

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

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

18. Kondo, K. (2010). Recent trend of traction drive systems for railway vehicles. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 5(1), 1-8.

19. Rodriguez, J., Bernet, S., Steimer, P. K., & Lizama, I. E. (2010). A survey on neutral-point-clamped inverters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(7), 2219-2230.

20. Standard IEC 61287-1:2014. Railway applications - Power converters installed on board rolling stock - Part 1: Characteristics and test methods.

21. Standard IEC 60349-2:2010. Electric traction - Rotating electrical machines for rail and road vehicles - Part 2: Electronic converter-fed alternating current machines.

22. Bernet, S. (2000). Recent developments of high power converters for industry and traction applications. IEEE Transactions on Power Electronics, 15(6), 1102-1117.

23. Carpita, M., & Marcheko, M. (2011). Traction inverters for 3 kV DC lines: A comparison among different topologies. Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE).

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. Trzynadlowski, A. M. (2000). Control of Induction Motors. Academic Press.

27. 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.

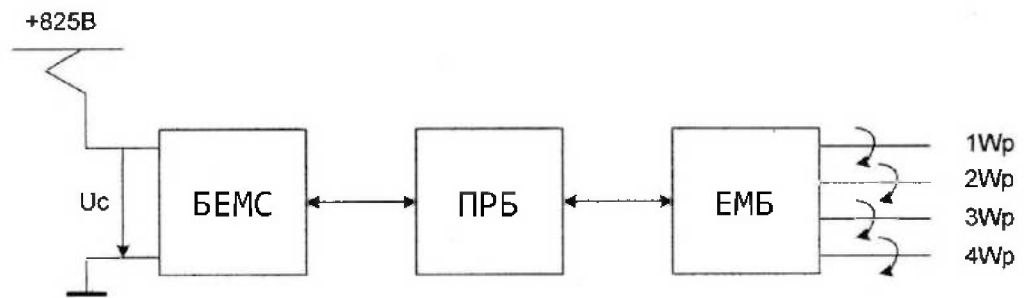
28. Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., & Blaabjerg, F. (2002). Control in Power Electronics: Selected Problems. Academic Press.

29. 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.

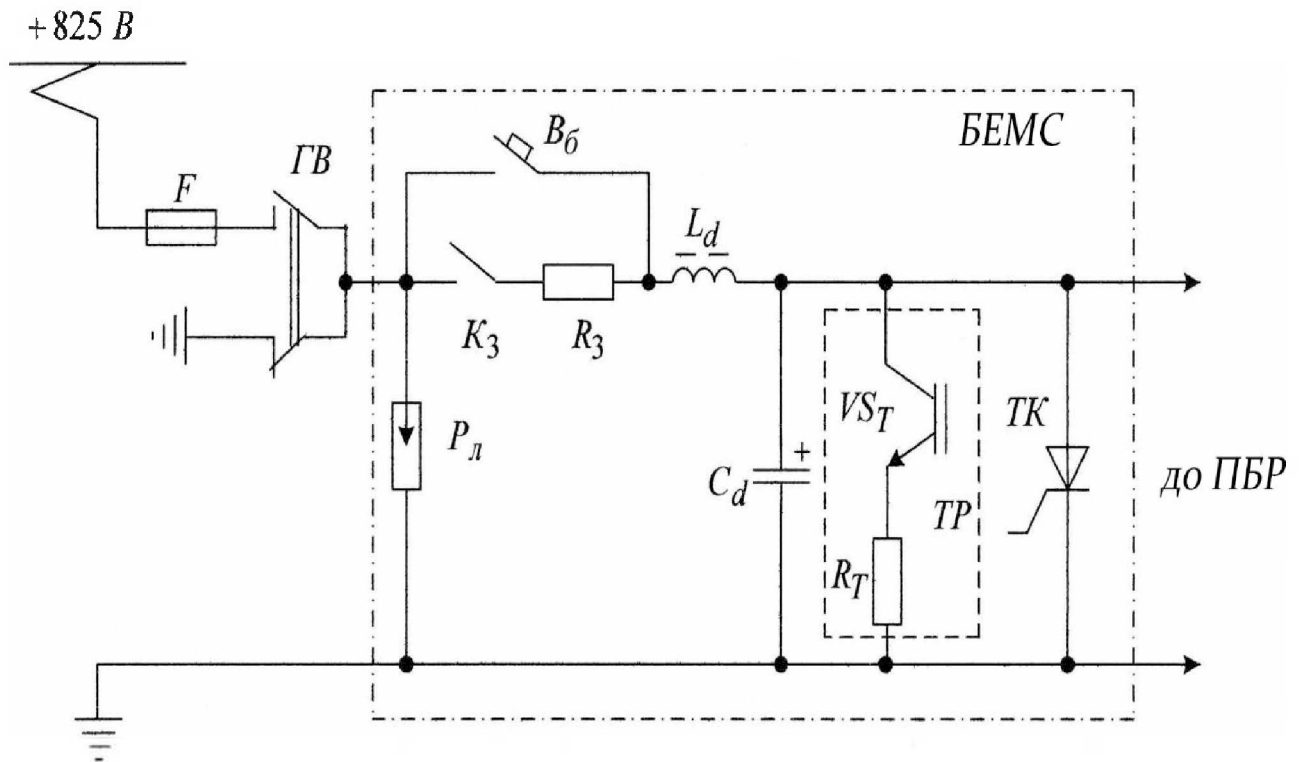
30. Engel, B., Styczynski, Z. A., & Bongiorno, M. (2014). High-power converters and modern DC traction systems: Challenges and practical implementation. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 55, 305-312.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249-03	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Структура тягової електропередачі з асинхронними двигунами



Силовая схема БЕМС при використанні традиційних підходів до забезпечення основних її функцій



Схеми комутаторів інверторів напруги на IGBT.

