

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

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

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ШВИДКІСНОГО
ТРАМВАЯ ТИПУ «ТАТРА Т-3» ІЗ ВПРОВАДЖЕННЯМ АСИНХРОННОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ЧАСТОТНИМ КЕРУВАННЯМ

Виконав:

здобувач вищої освіти групи ЗЕЕМ-22ск-1_____Микола ГАВРИЛАШ

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, ГАВРИЛАШ Микола Васильович, 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**

ГАВРИЛАШ Микола Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Модернізація електромеханічної системи швидкісного трамвая типу «ТАТРА Т-3» із впровадженням асинхронного електропривода з частотним керуванням»
2. Строк подання студентом роботи 13 червня 2025 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи підвищення енергоефективності, надійності та експлуатаційної доцільності трамвая Татра Т-3 шляхом розробки та обґрунтування модернізації його електромеханічної системи з використанням асинхронного електропривода з частотним керуванням. Основні завдання — проаналізувати наявну систему електропривода, розробити технічне рішення модернізації, здійснити розрахунок і вибір обладнання, побудувати модель роботи привода та оцінити ефективність запропонованого технічного рішення.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)
1. Аналіз сучасного стану електромеханічної системи трамвая Татра Т-3. 2. Проєкт модернізації електромеханічної системи трамвая Татра Т-3
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 модернізація електромеханічної системи швидкісного трамвая типу «ТАТРА Т-3»

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	Загальна структура та принцип роботи електромеханічної системи трамвая Татра Т-3	12 травня 2025 р.
2	Реостатно-контакторна система управління (РКСУ)	17 травня 2025 р.
3	Тягові електродвигуни та гальмівна система	20 травня 2025 р.
4	Розширений аналіз сучасного стану та ключові експлуатаційні проблеми	25 травня 2025 р.
5	Оцінка доцільності впровадження системи «асинхронний тяговий двигун – частотний перетворювач»	29 травня 2025 р.
6	Розрахунок параметрів частотного перетворювача для системи «АТД – ЧП»	30 травня 2025 р.
7	Структурна електрична схема тягового електропривода трамвая з живленням від постійного струму	02 червня 2025 р.
8	Аналітичний розрахунок енергоефективності енергетичного циклу роботи трамвая на різних системах керування.	05 червня 2025 р.
9	Висновки по роботі	11 червня 2025 р.

Дата видачі завдання 12 травня 2025 р.

Здобувач вищої освіти
ГАВРИЛАШ

(підпис)

Микола

(Ім'я Прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Ігор ПЕРЕСУНЬКО

(Ім'я Прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему
«Модернізація електромеханічної системи швидкісного трамвая типу
«ТАТРА Т-3» із впровадженням асинхронного електропривода з частотним
керуванням»

48 с., 12 рис., 15 літературних джерел.

ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4

Досліджуваний об'єкт - електромеханічна система трамвая типу Татра Т-3, що включає тяговий електропривод та систему керування рухом.

У першому розділі проведено аналіз розвитку трамвайного транспорту в Україні та огляд технічного стану електромеханічної системи трамвая Татра Т-3. Особливу увагу приділено недолікам застарілої реостатно-контакторної системи керування, що обґрунтовує необхідність модернізації.

У другому розділі розроблено технічне рішення модернізації електропривода трамвая Татра Т-3 із впровадженням асинхронного двигуна та інверторного керування. Проведено розрахунки основних параметрів системи, моделювання тягового циклу в середовищі MATLAB/Simulink та оцінено енергетичну ефективність модернізації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МОДЕРНІЗАЦІЯ, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ТРАМВАЙ ТАТРА Т-3, ЧАСТОТНЕ КЕРУВАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Реферат	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив		Гаврилаш М.						
Перевірів		Пересунько І.					5	1
Н. Контр.		Пересунько І.				КНУ гр. ЗЕЕМ-22ск		
Затвердж.		Пересунько І.						

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. Аналіз сучасного стану електромеханічної системи трамвая Татра Т-3	13
1.1. Загальна структура та принцип роботи електромеханічної системи трамвая Татра Т-3.....	13
1.2. Реостатно-контакторна система управління (РКСУ)	18
1.3. Тягові електродвигуни та гальмівна система.....	19
1.4. Розширений аналіз сучасного стану та ключові експлуатаційні проблеми	21
1.4. Оцінка доцільності модернізації із застосуванням системи «асинхронний тяговий двигун – частотний перетворювач»	24
1.4. Висновки до розділу 1	27
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНОГО СТЕНДУ	29
2.1. Оцінка доцільності впровадження системи «асинхронний тяговий двигун – частотний перетворювач»	29
2.2. Розрахунок параметрів частотного перетворювача для системи «АТД – ЧП»	34
2.3. Структурна електрична схема тягового електропривода трамвая з живленням від постійного струму	35
2.3. Аналітичний розрахунок енергоефективності енергетичного циклу роботи трамвая на різних системах керування	41
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив	Гаврилаш М.				Зміст			Літ.	Арк.	Акрушіє	
Перевірів	Пересунько І.								6	1	
								КНУ гр. ЗЕЕМ-22ск			
Н. Контр.	Пересунько І.										
Затвердж.	Пересунько І.										

ВСТУП

Розвиток трамвайних систем в Україні: від зародження до сьогодення та майбутніх перспектив

Трамвай, як вид міського громадського транспорту, має в Україні багату та складну історію, що налічує понад 130 років. Його розвиток нерозривно пов'язаний з економічними, політичними та соціальними змінами, що відбувалися в країні. Від перших кінних та парових ліній до сучасних, хоча й подекуди застарілих, електричних систем, трамвай залишив глибокий слід в урбаністичному ландшафті українських міст. Сьогодні, в умовах нових викликів та можливостей, питання його майбутнього стає особливо актуальним. Цей огляд базується на аналізі історичних та сучасних джерел, що висвітлюють еволюцію та перспективи українського трамвая.

Етапи розвитку трамвайних мереж

Історію українського трамвая можна умовно поділити на кілька ключових періодів:

1. **Зародження та дореволюційний розвиток (кінець XIX – початок XX століття):** Перший електричний трамвай на території сучасної України (та тодішньої Російської імперії) було запущено в Києві у 1892 році [1]. Ця подія стала відправною точкою для стрімкого розвитку трамвайних мереж в інших великих містах, таких як Львів, Харків, Одеса, Катеринослав (нині – Дніпро) та Єлисаветград (нині – Кропивницький). Трамвай став символом прогресу та індустріалізації, зв'язуючи промислові райони з центрами міст та новими житловими кварталами. На цьому етапі мережі будувалися переважно приватними компаніями, часто з іноземним капіталом, і характеризувалися

різноманітністю стандартів колії та

ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4

		різноманітністю стандартів коліт а			ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Гаврилаш М.			Вступ			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевірів		Пересунько І.								7	1
Н. Контр.		Пересунько І.						КНУ гр. ЗЕЕМ-22ск			
Затвердж.		Пересунько І.									

рухомого складу.

2. **Радянський період (1920-ті – 1991 рік):** Після встановлення радянської влади всі трамвайні господарства були націоналізовані. Цей період відзначився масштабним розширенням існуючих мереж та будівництвом нових. Трамвай розглядався як основний вид громадського транспорту, здатний перевозити величезні пасажиропотоки до заводів та фабрик. З 1960-х років розпочалася епоха уніфікації. Головним постачальником рухомого складу став чехословацький завод ŠKD, а його модель **"Татра ТЗ"** на десятиліття стала наймасовішим трамваем в Україні [2]. Водночас, у пізній радянський період, особливо з 1970-х років, почалася поступова стагнація. Розвиток автомобільного транспорту та будівництво метрополітенів у великих містах (Київ, Харків) призвели до того, що трамвай почали розглядати як застарілий вид транспорту. У деяких містах почалося скорочення ліній, особливо в центральних частинах.

3. **Період незалежності (з 1991 року до сьогодні):** Після розпаду СРСР трамвайні господарства України увійшли у глибоку кризу. Хронічне недофінансування, зношеність інфраструктури та рухомого складу, а також неконкурентоспроможність порівняно з маршрутними таксі призвели до значного занепаду. Багато міст скоротили або повністю ліквідували свої трамвайні системи, серед них Чернівці, Кропивницький, Макіївка, Вуглегірськ та інші [3]. Проте, з середини 2010-х років почало формуватися нове бачення ролі трамвая в міському просторі. Усвідомлення екологічних проблем, перевантаженості доріг та європейський досвід відродження трамвайних систем спонукали деякі міста до перегляду своєї транспортної політики.

"Татра ТЗ": незмінний символ українського трамвая

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Говорячи про український трамвай, неможливо оминати легендарну модель **"Татра ТЗ"**. Цей чехословацький вагон, що вироблявся з 1960-х до кінця 1990-х років, став справжньою "робочою конячкою" для десятків українських міст. Його популярність пояснювалася вдалим поєднанням надійності, простоти конструкції та ремонтпридатності.

На сьогоднішній день трамваї "Татра ТЗ" та їхні численні модифікації (ТЗСУ, ТЗСУС тощо) продовжують складати основу парку в більшості трамвайних міст України [4]. Серед них:

- **Київ:** Столиця має один з найбільших у світі парків трамваїв цієї моделі. Попри закупівлю нових вагонів, "Татри" продовжують активно експлуатуватися, проходячи глибокі модернізації, що дозволяють продовжити термін їхньої служби.
- **Харків:** Друге за величиною трамвайне господарство країни також значною мірою покладається на "Татри ТЗ". Місто проводить власні модернізації, змінюючи дизайн та оновлюючи технічне оснащення вагонів.
- **Одеса:** В Одесі "Татри" є невід'ємною частиною міського колориту. Як і в інших містах, тут проводяться ремонти та оновлення, щоб підтримувати вагони в робочому стані.
- **Дніпро, Львів, Запоріжжя, Вінниця, Кривий Ріг, Миколаїв, Конотоп** та інші міста також продовжують експлуатувати ці надійні, хоча й морально та фізично застарілі вагони.

Довговічність "Татри ТЗ" є водночас і благом, і проблемою. З одного боку, це дозволяє підтримувати рух за умов обмеженого фінансування. З іншого – консервує технологічну відсталість, низький рівень комфорту для пасажирів (особливо для маломобільних груп населення) та високі енерговитрати порівняно з сучасними аналогами.

Перспективність трамваїв у містах України: виклики та можливості

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Незважаючи на всі труднощі, трамвай має значний потенціал для сталого розвитку українських міст. Його майбутнє залежить від здатності подолати існуючі виклики та використати наявні переваги.

Переваги трамвая:

- 1. **Екологічність:** Трамвай є електричним транспортом, що не виробляє шкідливих викидів у місці експлуатації. В умовах глобальної кліматичної кризи та зростання вимог до якості повітря в містах це є вирішальним фактором.
- 2. **Висока провізна здатність:** Сучасний трамвайний поїзд може перевозити стільки ж пасажирів, скільки кілька автобусів або десятки легкових автомобілів. Це дозволяє ефективно боротися із заторами на дорогах [5].
- 3. **Енергоефективність:** Сучасні трамваї з системами рекуперації енергії (повернення енергії гальмування в мережу) є значно ефективнішими за автобуси з двигунами внутрішнього згоряння.
- 4. **Комфорт та доступність:** Низькопідлогові трамваї забезпечують легкий доступ для людей на інвалідних візках, батьків з дитячими візками та пасажирів похилого віку.
- 5. **Розвиток міського простору:** Будівництво або модернізація трамвайної лінії часто стає каталізатором для реконструкції вулиць, оновлення комунікацій та покращення громадських просторів навколо.

Основні виклики:

- 1. **Зношеність інфраструктури:** Більшість трамвайних колій, контактних мереж та тягових підстанцій в Україні потребують капітального ремонту або повної заміни. Їхній стан не дозволяє повною мірою використовувати швидкісні характеристики сучасних вагонів.

2. **Застарілий рухомий склад:** Переважна більшість вагонів є фізично та морально застарілими, не відповідають сучасним вимогам комфорту, доступності та енергоефективності.

3. **Високі початкові інвестиції:** Модернізація інфраструктури та закупівля нового рухомого складу потребують значних капіталовкладень, які є непосильними для багатьох муніципальних бюджетів. Яскравим прикладом є залучення міжнародних кредитів, наприклад, від Європейського інвестиційного банку [6].

4. **Конкуренція з нерегульованими перевізниками:** "Маршрутки" часто дублюють трамвайні маршрути, забираючи пасажирів та роблячи трамвай економічно не вигідним.

Шляхи до відродження:

Майбутнє українського трамвая лежить у площині комплексного підходу. Успішні приклади Вінниці, Львова та частково Києва показують, що відродження можливе за умови реалізації наступних кроків:

- **Розробка довгострокових транспортних стратегій:** Міста повинні чітко визначити роль трамвая у своїй транспортній системі.

- **Залучення фінансування:** Активна співпраця з міжнародними фінансовими інституціями (ЄІБ, ЄБРР), державні програми підтримки та державно-приватне партнерство можуть стати джерелом необхідних інвестицій [6].

- **Комплексна модернізація:** Оновлювати потрібно не лише вагони, а й усю інфраструктуру – колії (з укладанням на відокремлене полотно), контактну мережу, зупинки.

- **Власне виробництво та локалізація:** Розвиток вітчизняних виробників трамваїв, таких як "Татра-Юг" та "Електрон" [7], та локалізація виробництва іноземних моделей дозволить знизити вартість оновлення та створити нові робочі місця.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- **Оптимізація маршрутної мережі:** Необхідно переглянути маршрути, виключивши дублювання та забезпечивши зручні пересадки на інші види транспорту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.

Аналіз сучасного стану електромеханічної системи трамвая Татра Т-3

1.1. Загальна структура та принцип роботи електромеханічної системи трамвая Татра Т-3

Трамвайний вагон Татра-Т3, незважаючи на свій поважний вік, залишається основою рухомого складу в більшості трамвайних господарств України. Його довговічність зумовлена вдалою конструкцією та простотою в обслуговуванні, однак його електромеханічна система, що була передовою для 1960-х років, на сьогодні є морально і фізично застарілою.

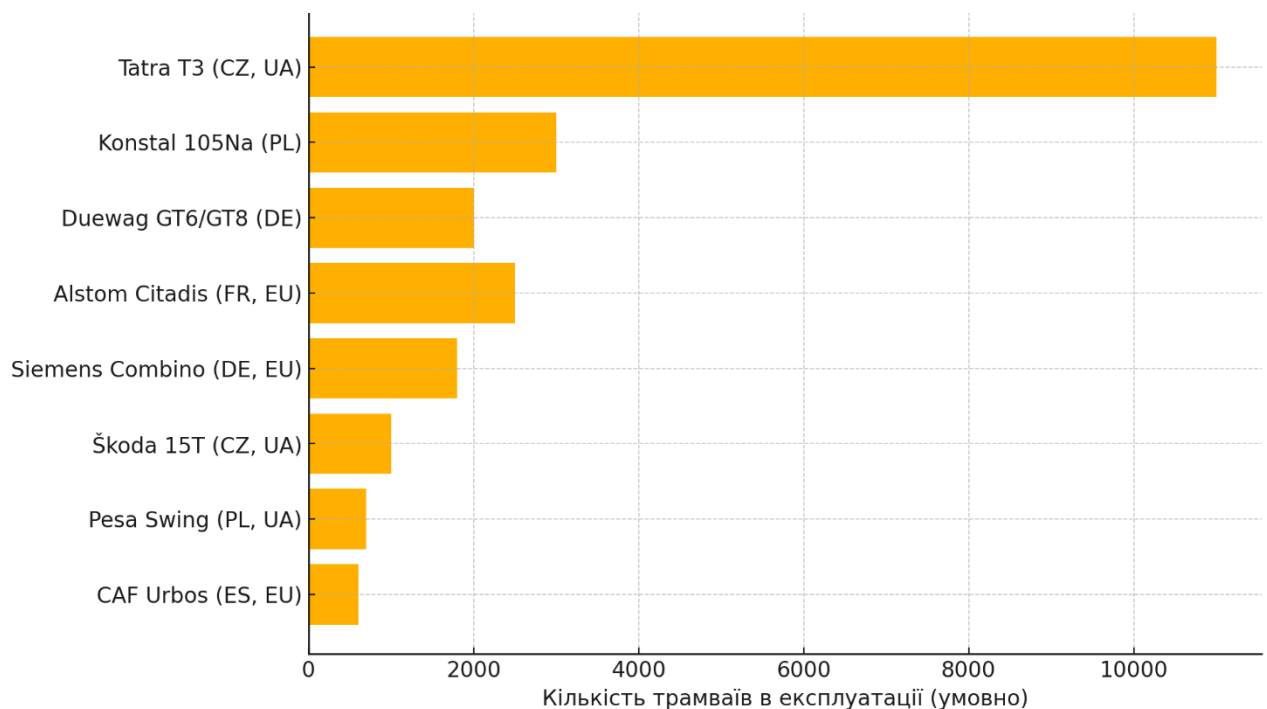


Рисунок 1.1 Найбільш розповсюджені моделі трамваїв у Європі та Україні

Ось діаграма, яка показує найбільш розповсюджені моделі трамваїв у Європі та Україні. Наймасовішим залишається Tatra T3, особливо в країнах колишнього СРСР і Центральної Європи. Також популярні моделі, як Konstal 105Na у Польщі, Alstom Citadis, Škoda 15T та Pesa Swing, активно

		використовуються в модернізованих мережах.			ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розробив	Гаврилаш М.				Розділ			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І.									
Н. Контр.	Пересунько І.							КНУ гр. ЗЕЕМ-22ск		
Затвердж.	Пересунько І.									

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[illegible]

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Візок складається: 1, 5 - мости; 2, 6 - поздовжні балки; 3 - карданний вал; 4 - тяговий двигун; 7 - балка для підвішування тягового двигуна; 8 - п'ятник; 9 - шкворневая балка; 10 - електромагнітний привід барабанного гальма; 11 - надколесные кожухи.

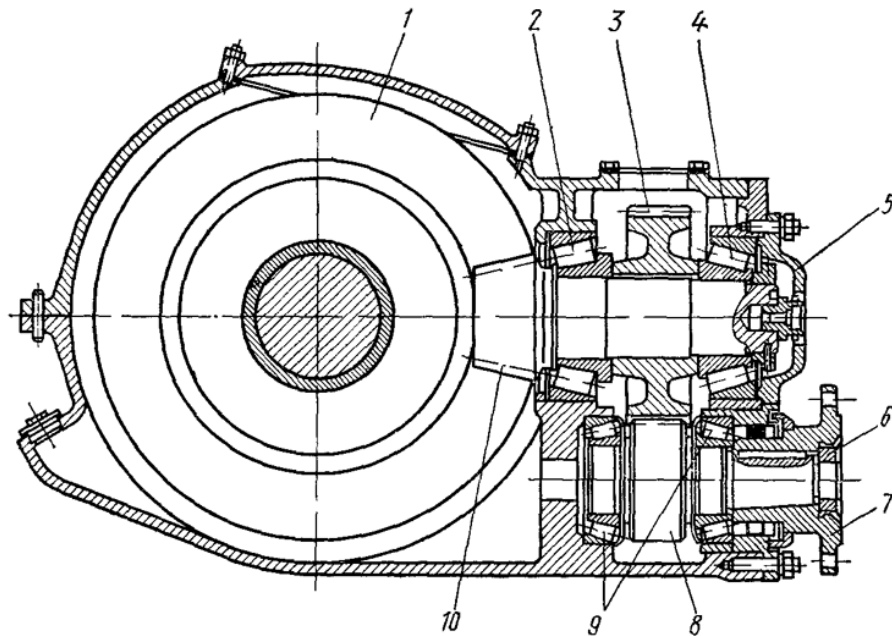


Рисунок 1.4 - Двоступінчастий редуктор вагона Tatra-T3

1, 10 - конические шестерни; 2, 4, 9 - роликовые подшипники; 3 - большое цилиндрическое колесо; 5 - крышка; 6 - гайки; 7 - фланец; 8 - малая цилиндрическая шестерня.

Таблиця 1.1 - Основні технічні дані трамвайних вагонів сімейства „Татра”

Показники	Характеристики вагонів типа	
	Т-3	Т-4СУ
Діаметр колеса по колу катання, мм	700	700
Число тягових двигунів	4	4
Тип тягового двигуна	TE-022	TE-022
„Продолжительная” потужність тягового двигуна, кВт	40	40
Загальне передаточне число редуктора: з „гипоидной” передачею(одноступінчатий редуктор)	1:7,43	1:7,43
з „равнинной ” передачею(двоступінчатий редуктор)	1:7,36	1:7,36
з „горной” передачею(двоступінчатий редуктор)	1:9,36	1:9,36
Конструкційна швидкість вагона, км/год: при передаточному відношенні 1:7,43 і 1:7,36.	72	72
при передаточному відношенні 1:9,36.	57	-
Найбільша стала швидкість порожнього вагона на „равнинном” прямій ділянці при напрузі 600В і середнім діаметрі колес, км/год: при передаточному відношенні 1:7,43 і 1:7,36.	65	65
при передаточному числі 1:9,36.	50	-
Найбільше прискорення порожнього вагона, м/с ²	1,8	1,8
Найбільше уповільнення порожнього вагона при службовому гальмуванні м/с ²	1,8	1,8
Середнє уповільнення порожнього вагона при екстремому гальмуванні, м/с ²	2,3	2,3
Номінальна місткість вагона при наповнюванні 5люд/м ² , люд.	115	93
В тому числі:		
місць для сидіння.	38	35
місць для стояння.	77	58
Найбільша місткість вагона при наповнюванні 10люд/м ² , люд.	193	150
Вільна площа підлоги для стоячих пасажирів, м ²	15,5	11,5
Маса порожнього вагона, т.	17,0	16,2
Маса вагона з пасажирями при наповнюванні 10люд/м ² (маса людини 70кг), т.	30,5	26,8

Структурно система складається з трьох основних функціональних частин:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Силові ланцюги: Включають струмоприймач (пантограф), головний вимикач, пуско-гальмівні реостати, силові контактори та тягові електродвигуни (ТЕД).
2. Система керування: Центральним елементом є реостатно-контакторна система управління (РКСУ), яка реалізована за допомогою групового реостатного контролера – прискорювача (акселератора).
3. Допоміжне обладнання: Включає мотор-генератор (або статичний перетворювач у модернізованих версіях) для живлення низьковольтних кіл (24 В), компресор, системи освітлення та опалення.

Принцип роботи полягає в ступінчастому регулюванні напруги, що подається на тягові двигуни. Це досягається шляхом поступового виведення з електричного кола опорів (реостатів) за допомогою прискорювача. Чим менший опір у колі, тим більша напруга подається на двигуни, і, відповідно, тим вища швидкість вагона.

1.2. Реостатно-контакторна система управління (РКСУ)

Серцем і найбільш характерним вузлом трамвая Татра-ТЗ є його система управління. Вона базується на електромеханічному апараті – **прискорювачі**.

Прискорювач – це багатопозиційний кулачковий контролер з сервоприводом. Він являє собою вал з великою кількістю кулачків (ексцентриків), які при його обертанні в певній послідовності замикають та розмикають силові контакти (пальцеві контактори). Кожен контакт відповідає за комутацію певної секції пуско-гальмівних реостатів.

- **Пуско-гальмівні реостати:** Це набори потужних опорів, виготовлених зі спеціального сплаву (фехраль), які встановлені на даху вагона для кращого охолодження. Їхня функція – обмежувати пусковий

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струм для плавного розгону та розсіювати енергію у вигляді тепла під час електродинамічного гальмування.

- **Процес розгону:** Водій за допомогою педалі задає бажане прискорення. Система автоматично, за допомогою серводвигуна, обертає вал прискорювача. Кулачки послідовно замикають контакти, виводячи секції реостатів з кола ТЕД. Система має 99 реостатних позицій, що забезпечує відносно плавний розгін.

- **Перегрупування двигунів:** Для підвищення ККД на високих швидкостях система автоматично перемикає групи з двох тягових двигунів з послідовного з'єднання (серієсного, S) на паралельне (серієс-паралельне, SP). Це дозволяє подавати на кожен двигун повну напругу мережі.

На момент створення це була передова система, що забезпечувала автоматизований плавний розгін. Однак сьогодні вона є головним джерелом проблем.

1.3. Тягові електродвигуни та гальмівна система

На трамваях Татра-Т3 встановлено чотири тягові двигуни постійного струму моделі **ТЕ 022** з послідовним (серієсним) збудженням. Їх номінальна потужність становить 40-43 кВт кожен. Ці двигуни мають м'яку характеристику (значна зміна частоти обертання при зміні навантаження), що є оптимальним для тягового приводу.

Гальмівна система трамвая є комплексною і включає три незалежні види гальм:

1. Електродинамічне гальмо (ЕДГ): Основне службове гальмо. При гальмуванні тягові двигуни переходять у режим генераторів. Вироблена ними енергія не повертається в мережу (рекуперація відсутня

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в базовій конструкції), а гаситься на пуско-гальмівних реостатах, перетворюючись на тепло. Ефективність ЕДГ падає на низьких швидкостях (нижче 5-7 км/год), тому для повної зупинки вагон догальмовує механічним гальмом.

2. Електромагнітне (рейкове) гальмо: Використовується для екстреного гальмування. Складається з потужних електромагнітів, розташованих між колесами. При подачі на них струму від акумуляторної батареї, вони з величезною силою притягуються до рейки, створюючи значне гальмівне зусилля.

3. Механічне (барабанне) гальмо: Встановлено на валу кожного тягового двигуна. Використовується як стоянкове (для утримання вагона на місці) та для догальмовування на низьких швидкостях.

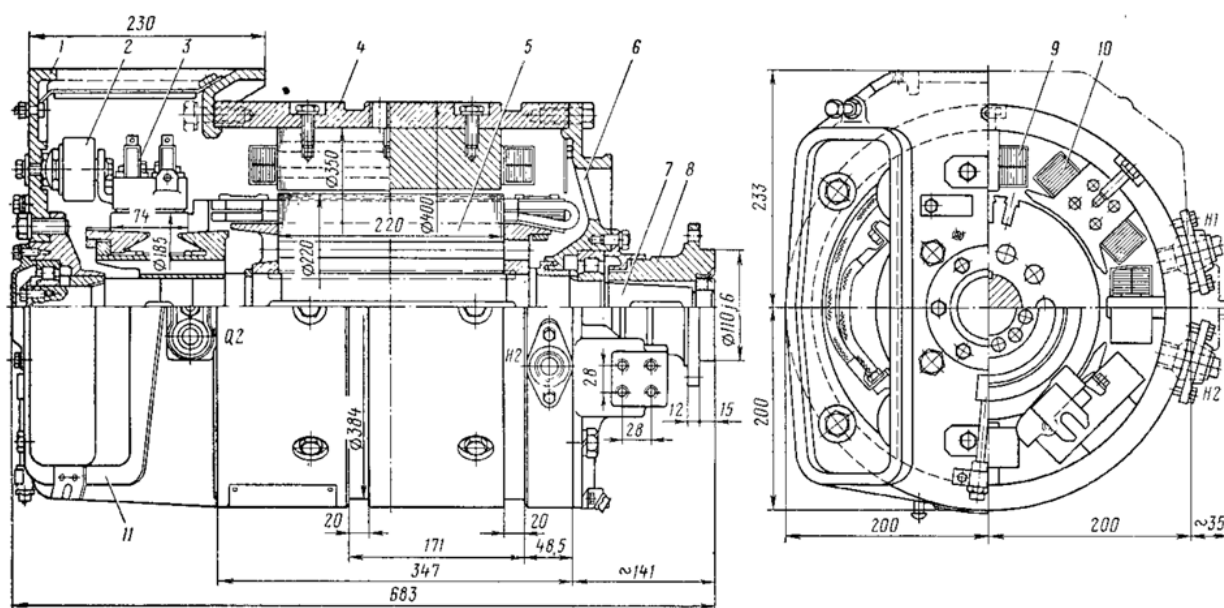


Рисунок 1.4 - Тяговий електродвигун ТЕ-022 вагона Tatra-T3

Тяговий двигун ТЕ-022 має наступні технічні дані:

Часовий режим: потужність 45 кВт

струм 150 А

к.к.д. 91 %

частота обертання..... 1750 об/хв

Найбільша частота обертання..... 4200 об/хв

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Номинальну напругу.	300 В
Опір обмоток при $t=20^0\text{C}$: якоря.	0,0545 Ом
головних полюсів.	0,026 Ом
додаткових полюсів.	0,0245 Ом
Загальний опір двигуна.	0,1050 Ом
Клас ізоляції обмоток.	В
Електрична міцність ізоляції обмоток.	600 В
Опір ізоляції обмоток по відношенню к корпусу для негріючих обмоток не менше.	0,64 МОм
Витрати охолоджувального повітря.	7,5 м ³ /хв
Маса двигуна.	320 кг

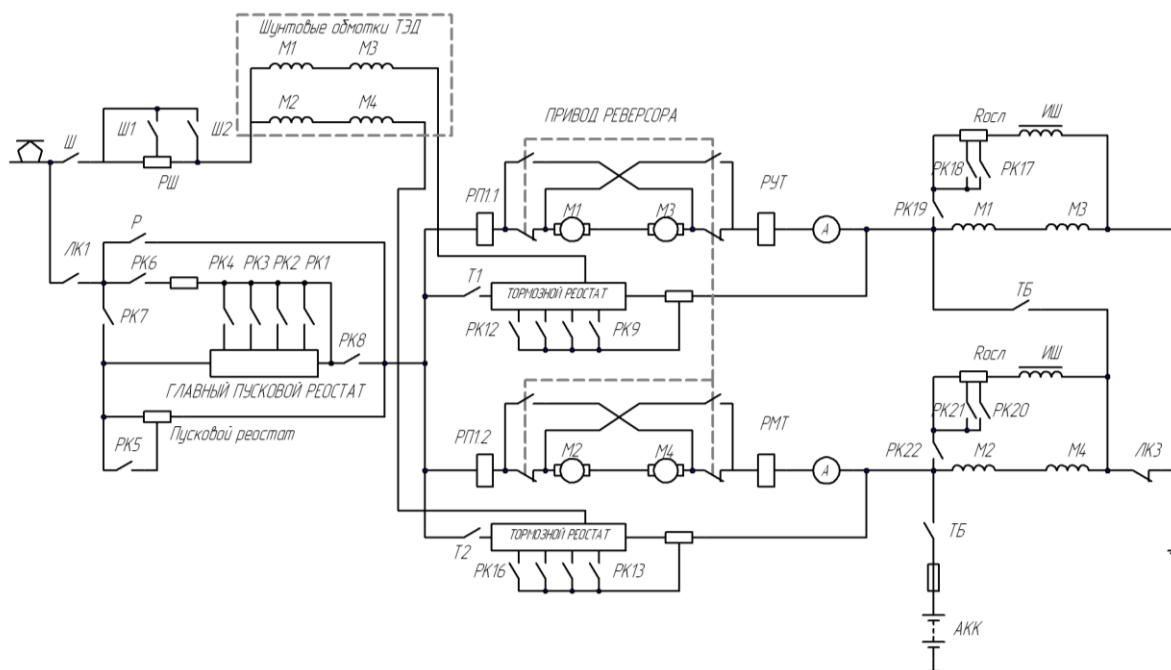


Рисунок 1.5 - Високовольтна схема трамваю Татра Т3.

1.4. Розширений аналіз сучасного стану та ключові експлуатаційні проблеми

Багаторічна інтенсивна експлуатація трамваїв Татра-Т3, особливо в умовах недостатнього фінансування та старіння парку, дозволила глибоко

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

вивчити та систематизувати недоліки їхньої електромеханічної системи. Ці проблеми є комплексними і впливають на всі аспекти роботи трамвая – від економіки перевезень до безпеки руху.

Надзвичайно низька енергоефективність. Це фундаментальна і найвагоміша проблема реостатно-контакторної системи управління (РКСУ). Втрати енергії відбуваються на двох ключових етапах:

- Під час розгону: Вся енергія, яка не йде безпосередньо на створення тягового зусилля, розсіюється на пускових реостатах у вигляді тепла згідно із законом Джоуля-Ленца. На низьких швидкостях, коли опір реостатів у колі максимальний, ці втрати можуть сягати 40-50% від усієї спожитої енергії. Це фактично означає, що вагон "опалює вулицю" замість того, щоб ефективно використовувати електроенергію.
- Під час гальмування: У базовій конструкції Татра-Т3 відсутня система рекуперативного гальмування. Вся кінетична енергія важкого вагона під час службового гальмування перетворюється тяговими двигунами в електричний струм, який знову ж таки, не повертається в контактну мережу, а примусово "спалюється" на тих самих реостатах.

Сучасні трамваї, оснащені тиристорно-імпульсними (ТІСУ) або транзисторними (IGBT) системами управління, позбавлені цих недоліків. Вони забезпечують безреостатний пуск та дозволяють повертати в мережу значну частину енергії при гальмуванні. За оцінками фахівців, модернізація трамвая Татра-Т3 зі встановленням сучасної системи керування дозволяє зекономити до 40% електроенергії, що в масштабах великого трамвайного депо виливається у величезні кошти [8].

Низька експлуатаційна надійність та механічний знос. Прискорювач та контакторна панель є складними електромеханічними вузлами з сотнями рухомих деталей, що працюють у важких умовах вібрації та високих струмових навантажень. Це неминуче призводить до:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Інтенсивного зносу: Постійному зносу піддаються кулачкові шайби прискорювача, пальцеві контактори, силові кабелі, щітки серводвигуна.
- Підгоряння та окислення контактів: Через іскріння під час комутації високих струмів контакти підгоряють, їхній перехідний опір зростає, що веде до перегріву, "залипання" або, навпаки, втрати контакту.
- Порушення регулювань: З часом порушується циклограма роботи прискорювача, що призводить до неправильної послідовності виведення реостатів, ривків та ударних навантажень на трансмісію.

Ці фактори спричиняють високу інтенсивність відмов обладнання. Часті поломки на лінії призводять до збоїв у графіку руху, утворення заторів з трамваїв та зниження загальної ефективності транспортної системи [9].

Високі експлуатаційні витрати. Ця проблема безпосередньо впливає з попередньої. Витрати на утримання парку трамваїв з РКСУ є значно вищими порівняно з сучасними аналогами і складаються з:

- Вартості запчастин: Постійна потреба в заміні зношених елементів. Часто оригінальні запчастини вже не виробляються, а якість аналогів є низькою.
- Трудовитрат на обслуговування: РКСУ вимагає регулярного огляду, чищення, регулювання та ремонту, що потребує великої кількості людино-годин кваліфікованого персоналу слюсарів-електриків.
- Втрат від простоїв: Кожен день простою вагона в ремонті – це втрачений дохід для перевізника.

Низький рівень комфорту та безпеки. Для пасажирів поїздка на трамваї з несправною або розрегульованою РКСУ перетворюється на випробування. Ступінчастий характер регулювання швидкості спричиняє відчутні ривки (поштовхи) не лише при старті, але й під час переходу з одного ходового положення на інше (наприклад, при перегрупуванні двигунів з послідовного на

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

паралельне з'єднання). Гучні **клацання контакторів** під підлогою створюють значний акустичний дискомфорт. З точки зору безпеки, відмова РКСУ в русі може призвести до втрати тяги або службового електродинамічного гальма, що змушує водія застосовувати екстрене гальмування.

Складність діагностики. В системі відсутні будь-які засоби самодіагностики. Пошук несправності в розгалужених і складних релейно-контактних колах базується виключно на досвіді, знаннях та інтуїції наладчика. Цей процес може займати багато часу і вимагає глибокого розуміння роботи кожного елемента схеми. На відміну від цього, сучасні мікропроцесорні системи управління миттєво видають код помилки, вказуючи на конкретний несправний вузол, що в разі прискорює ремонт [10].

Таким чином, електромеханічна система Татра-Т3, будучи надійною "робочою конячкою" в минулому, сьогодні є головним стримуючим фактором для підвищення ефективності та якості трамвайних перевезень в Україні.

1.4. Оцінка доцільності модернізації із застосуванням системи «асинхронний тяговий двигун – частотний перетворювач»

Як було показано в попередньому аналізі, реостатно-контакторна система управління (РКСУ) є головним джерелом технічних та економічних проблем трамвая Татра-Т3. Найбільш кардинальним та ефективним шляхом вирішення цих проблем є глибока модернізація, що передбачає повну заміну тягового приводу постійного струму на сучасну систему на базі асинхронного двигуна (АТД) та тягового частотного перетворювача (інвертора).

Ключові компоненти нової системи:

1. Тяговий інвертор (частотний перетворювач): Це "мозок" нової системи. Зазвичай він виконаний на базі сучасних силових напівпровідникових приладів – IGBT-транзисторів (Insulated-Gate Bipolar Transistor). Інвертор

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перетворює постійний струм з контактної мережі (600 В) на трифазний змінний струм регульованої частоти та напруги. Саме плавна зміна цих параметрів дозволяє точно та безступінчасто керувати швидкістю та крутним моментом асинхронного двигуна.

2. Асинхронний тяговий двигун (АТД): Це "м'язи" системи. На відміну від двигунів постійного струму, АТД має значно простішу та надійнішу конструкцію. Його головна перевага – відсутність колекторно-щіткового вузла, який є найменш надійним елементом у двигунах постійного струму. АТД практично не потребує обслуговування протягом усього терміну служби, є більш компактним та легким за аналогічної потужності.
3. Мікропроцесорна система управління та діагностики (МСУ): Вона контролює роботу тягового інвертора, збирає інформацію з усіх датчиків, забезпечує оптимальні режими розгону та гальмування, а також виконує функції бортового самописця та діагностичного комплексу. У разі виникнення несправності система миттєво інформує водія та записує код помилки, що значно спрощує та прискорює пошук і усунення проблеми [14].

Оцінка переваг та ефектів від модернізації:

Впровадження системи «АТД – частотний перетворювач» дозволяє вирішити всі ключові проблеми, описані в підрозділі 1.5.

1. Кардинальне підвищення енергоефективності:

- Ліквідація реостатних втрат: Розгін відбувається безступінчасто шляхом зміни частоти струму, що живить двигуни. Пускові реостати відсутні як клас, отже, втрати енергії на нагрів під час розгону дорівнюють нулю.
- Ефективна рекуперація: Під час гальмування інвертор перетворює кінетичну енергію вагона в електроенергію, яка повертається назад

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

у контактну мережу для споживання іншими вагонами на лінії. Це дозволяє досягти економії електроенергії на рівні 30-40% порівняно з базовою реостатною системою [11, 15].

2. Підвищення надійності та зниження експлуатаційних витрат:

- Надійність: Відсутність рухомих та трущихся частин в системі управління (як у прискорювачі) та в тяговому двигуні (колектор, щітки) радикально підвищує надійність усього тягового приводу. Кількість відмов на лінії скорочується в рази.
- Експлуатаційні витрати: Витрати на обслуговування та ремонт скорочуються на 50-60% завдяки відсутності потреби в регулярній заміні щіток, контактів, регулюванні прискорювача тощо [14].

3. Покращення тягових та динамічних характеристик:

- Плавність ходу: Безступінчасте регулювання крутного моменту забезпечує абсолютно плавний розгін та гальмування без ривків та поштовхів, що значно підвищує комфорт для пасажирів.
- Динаміка: Асинхронний привід дозволяє реалізувати вищі динамічні показники, покращує керованість та протибуксувальні властивості, що особливо важливо на складних ділянках (підйоми, криві) та за поганих погодних умов.

4. Продовження терміну служби вагона: Така глибока модернізація дозволяє продовжити термін експлуатації кузова та візків вагона ще на 10-15 років. Враховуючи, що вартість модернізації складає приблизно 30-40% від вартості нового трамвая, це є економічно вигідним рішенням для муніципалітетів з обмеженими бюджетами [15].

Виклики та доцільність:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Головним викликом є висока початкова вартість модернізації. Вона вимагає значних капітальних інвестицій. Однак, при розрахунку повної вартості життєвого циклу (LCC – Life Cycle Cost), проєкт стає економічно обґрунтованим. Термін окупності інвестицій за рахунок економії електроенергії та зниження експлуатаційних витрат, за різними оцінками, може складати від 5 до 8 років, що є прийнятним показником для інфраструктурних проєктів.

1.4. Висновки до розділу 1

У цьому розділі проведено аналіз конструкції, принципу дії та експлуатаційних особливостей електромеханічної системи трамвая Tatra T-3, яка є однією з найпоширеніших моделей електротранспорту в Україні та країнах Центрально-Східної Європи. Типова система електропривода Tatra T-3 базується на реостатно-контакторному керуванні тяговими двигунами постійного струму, що є морально та технічно застарілим рішенням.

Виявлено основні недоліки такої системи:

- значні втрати електроенергії під час пуску через роботу реостатів;
- низька енергоефективність та повна відсутність рекуперації;
- висока трудомісткість технічного обслуговування через наявність колекторно-щіткового вузла;
- недостатня плавність ходу, що негативно впливає на комфорт пасажирів;
- часті відмови та потреба в ремонтах елементів керування.

Отже, зроблено висновок, що для продовження строку служби, підвищення ефективності та комфорту експлуатації трамвай Татра Т-3 потребує глибокої технічної модернізації. Найбільш доцільним рішенням є заміна тягового електропривода на сучасну систему, що базується на асинхронному двигуні з частотним керуванням. Такий підхід відкриває нові можливості для

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергозбереження, підвищення надійності та економічної ефективності функціонування електротранспорту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНОГО СТЕНДУ

2.1. Оцінка доцільності впровадження системи «асинхронний тяговий двигун – частотний перетворювач»

Модернізація трамвая Татра Т-3 із заміною реостатно-контакторної системи на сучасну систему асинхронного тягового електропривода є не просто актуальним, а стратегічно важливим кроком у розвитку міського електротранспорту. Нижче наведено техніко-економічне обґрунтування доцільності такої модернізації на базі розрахунків, графіків і принципових переваг асинхронного привода.

Основи динамічного розрахунку

Для забезпечення розгону трамвая необхідна тяга, яка залежить від маси, прискорення та опору коченню. Оцінимо потужність, необхідну для ефективної роботи привода.

Вихідні дані:

- Маса трамвая з пасажирами: $18 \cdot 1000 \text{ кг}$
- Прискорення при розгоні: $a = 1.2 \text{ м/с}^2$
- Максимальна швидкість: $v_{\max} = 65 \text{ км/год} = 18.06 \text{ м/с}$
- Коефіцієнт опору коченню: $f = 0.02$
- ККД трансмісії та передач: $\eta = 0.85$

Розрахунок сили тяги:

$$F_{\text{розгону}} = m \cdot a = 18000 \cdot 1.2 = 21600 \text{ Н}$$

$$F_{\text{опір}} = m \cdot g \cdot f = 18000 \cdot 9.81 \cdot 0.02 = 3531.6 \text{ Н}$$

$$F_{\text{сумарна}} = F_{\text{розгону}} + F_{\text{опір}} = 25131.6 \text{ Н}$$

Потужність на колесах:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Гаврилай М.				Розділ	Літ.	Арк.
Перевірів	Пересунько І.						Акрушів
Н. Контр.	Пересунько І.					КНУ гр. ЗЕЕМ-22ск	
Затвердж.	Пересунько І.						

$$P_{\text{колеса}} = F_{\text{сумарна}} \cdot v_{\text{max}} = 25131.6 \cdot 18.06 = 453765 \text{ Вт}$$

Потужність двигуна з урахуванням ККД:

$$P_{\text{двигуна}} = \frac{P_{\text{колеса}}}{\eta} = \frac{453765}{0.85} \approx 534 \text{ кВт}$$

Таким чином, орієнтовна сумарна потужність тягового привода повинна складати приблизно 530–550 кВт. У конфігурації з чотирма двигунами доцільно використовувати 4×132 кВт (або 4×110 –135 кВт) асинхронні двигуни.

Обраний двигун:

Номінальна потужність: 110 □ кВт

Напруга: 380 □ В (лінійна, Δ-з'єднання)

Частота: 50 □ Гц

Кількість полюсів: 4-полюсний (синхронна швидкість $\approx$ □ 1500 □ об/хв)

Клас ефективності: IE3 ($\approx$ □ 95.2 □ % при 110 □ кВт, 50 □ Гц)

ККД $\approx$ 95 □ %

Сопротивление обмотки статора ($R_{\square}$) $\sim$ 0.933 □ Ω/фаза

Линейная индуктивная реактивность статора ($X_{\square}$) $\sim$ 1.803 □ Ω/фаза

Опір обмотки ротора, приведений до статора (R_R'): $\sim$ 0.393 □ Ω/фаза

Реактивность ротора (X_R'): $\sim$ 2.428 □ Ω/фаза

Опір втрат у магнітному колі ($R_{\square \square}$): $\sim$ 2252.9 □ Ω/фаза

Реактивность намагнічування ($X_{\square}$) $\sim$ 68.07 □ Ω/фаза

Максимальний стартовий момент: $\sim$ 240 □ % від номінального

Крутний момент зриву: $\sim$ 310 □ %

Час теплового нагрівання до 80 □ К близько 22 хв

Час відновлення після вимикання: близько 68 □ хв

Приклад розрахунку крутного моменту при $s=0.04$ (номінальне ковзання)

Загальний опір:

$$Z = R_1 + \frac{R_2'}{s} = 0.933 + \frac{0.393}{0.04} = 0.933 + 9.825 = 10.76 \text{ Ом}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальна індуктивність:

$$X = X_1 + X'_2 = 1.803 + 2.428 = 4.231 \text{ Ом}$$

Квадрат напруги на фазу:

$$U_{1\phi} = \frac{380}{\sqrt{3}} \approx 219.4 \text{ В}, \quad U_1^2 = 219.4^2 = 48144 \text{ В}^2$$

Крутний момент:

$$T = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{48144 \cdot (0.393/0.04)}{(10.76)^2 + (4.231)^2}$$
$$T = \frac{3}{157.1} \cdot \frac{472801}{132.7} = \frac{3}{157.1} \cdot 3563.5 \approx 68.08 \text{ Н} \cdot \text{с/рад}$$

Це фазний момент, а повний момент двигуна:

$$T_{\text{заг}} = 3 \cdot T = 204.24 \text{ Н} \cdot \text{с/рад}$$

Енергетичні характеристики:

Потужність на валу:

$$P_2 = T \cdot \omega \approx 204.24 \cdot 157.1 \approx 32.1 \text{ кВт} \quad (\text{у фазі}) \Rightarrow \text{Сумарно} = 96.3 \text{ кВт}$$

Електрична вхідна потужність:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \approx 130\text{--}135 \text{ кВт}$$

ККД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \approx \frac{110}{132} \approx 0.833 \text{ (83.3\%)}$$

Обчислюється повний фазний струм I як:

$$I = \left| \frac{U_1}{Z(s)} \right|, \quad \text{де } Z(s) = R_1 + \frac{R'_2}{s} + j(X_1 + X'_2)$$

Криві показують зміну струму в залежності від ковзання при кожній частоті.

Характерно: найбільший струм — при пуску ($s \approx 1$), найменший — при номінальному ковзанні ($s \approx 0.04$).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

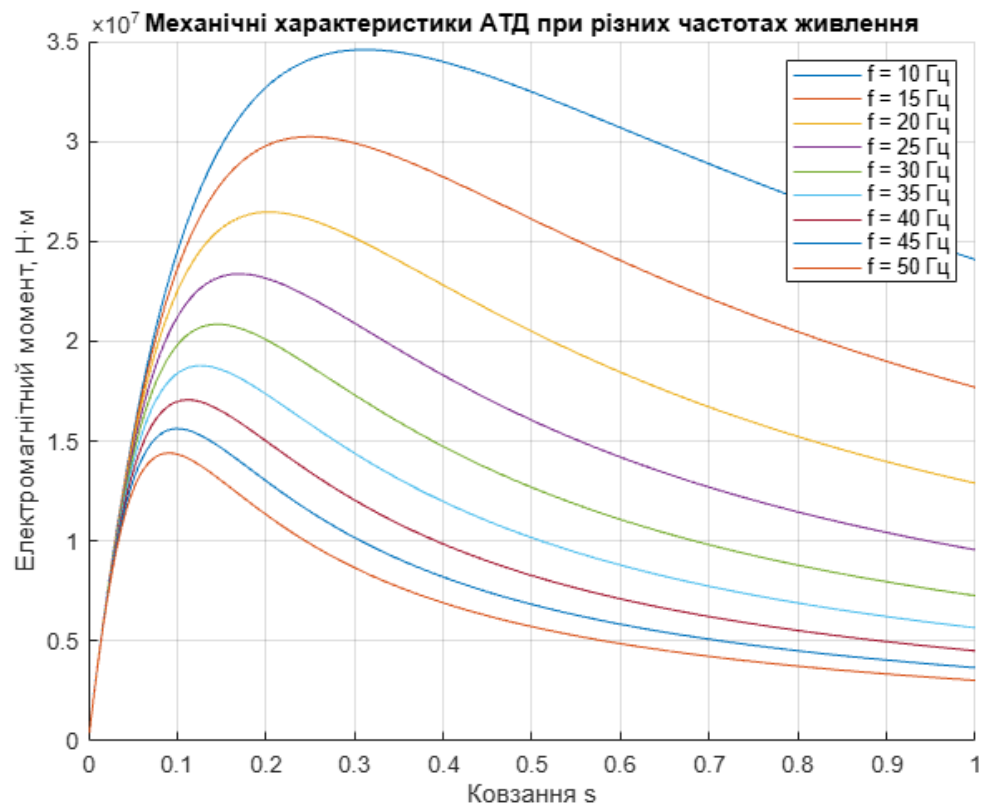


Рисунок 2.1 Механічні характеристики АТД при різних частотах живлення

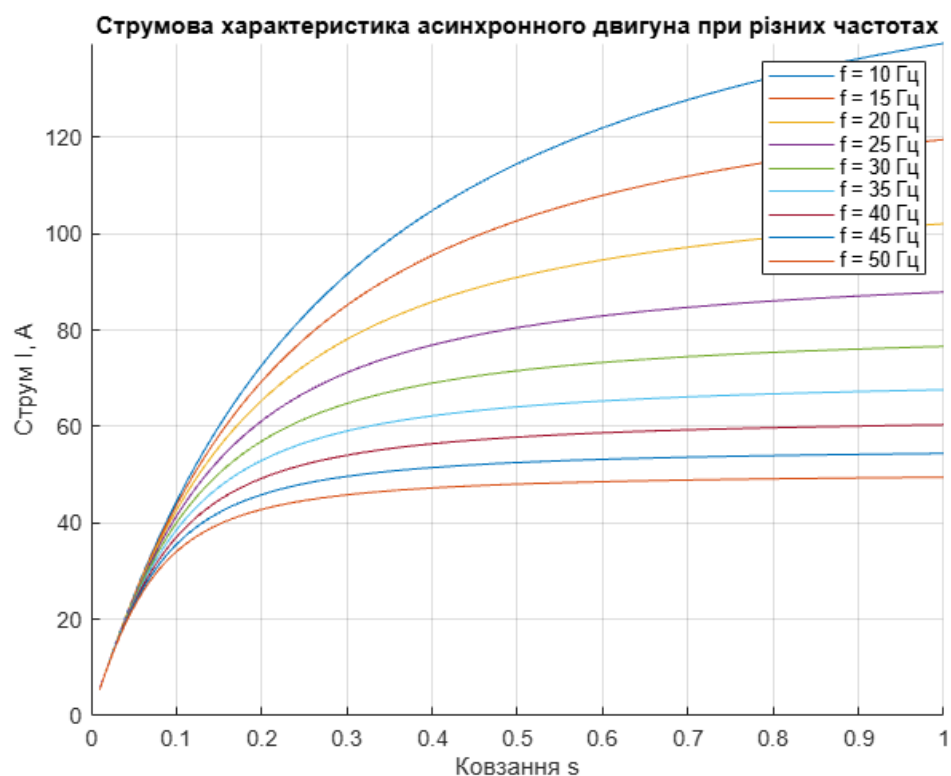


Рисунок 2.2 Електромеханічна характеристики АТД при різних частотах живлення

Повний вхідний струм:

$$I = \frac{U_1}{Z(s)} = \frac{U_1}{R_1 + \frac{R'_2}{s} + j(X_1 + X'_2)}$$

Вхідна потужність (трифазна):

$$P_{in} = 3 \cdot |I|^2 \cdot \operatorname{Re}(Z)$$

Корисна потужність (на валу):

$$P_{out} = 3 \cdot |I|^2 \cdot \frac{R'_2}{s}$$

ККД:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

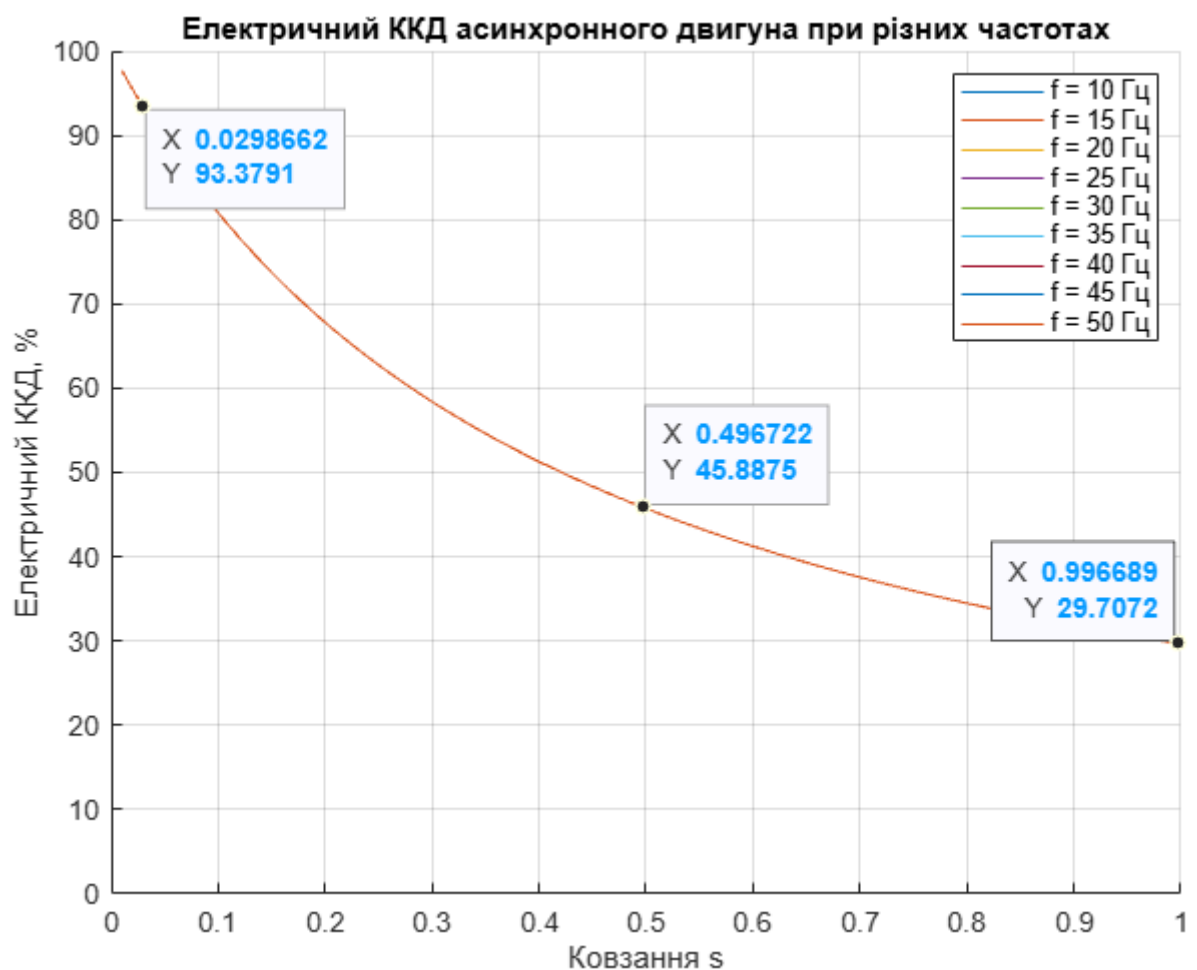


Рисунок 2.3 ККД асинхронного двигуна при різних частотах

2.2. Розрахунок параметрів частотного перетворювача для системи «АТД – ЧП»

Для забезпечення повноцінної роботи асинхронного двигуна з частотним регулюванням необхідний частотний перетворювач (інвертор), здатний:

- змінювати частоту живлення від 0 до 50Гц;
- забезпечити плавний пуск, зупинку, рекуперацію;
- витримувати пікові навантаження;
- захищати силові елементи від перевантажень та коротких замикань.

Розрахунок номінального струму двигуна:

$$I_{\text{двиг}} = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta}$$
$$I_{\text{двиг}} = \frac{110000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.88 \cdot 0.95} \approx 189.2 \text{ А}$$

З урахуванням запасу 20 %

$$I_{\text{ЧП}} \approx 1.2 \cdot 189.2 \approx 227 \text{ А}$$

Особливість живлення трамвая.

Контактна мережа трамвая забезпечує постійну напругу $U_{\text{DC}} = 600 \text{ В}$ (іноді з варіаціями 500–750 В), тому інвертор може живитися напругу від мережі без традиційного випрямляча.

Адаптована схема для трамвая:

[DC 600 В (тролейна мережа)] → [DC-шина] → [Інвертор (IGBT)] → [АТД]

У цьому випадку частотний перетворювач працює як чистий інвертор, отримуючи енергію з зовнішнього джерела постійного струму.

Напруга на DC-шині:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мінімальна напруга DC-шини для генерації трифазної напруги змінного струму:

$$U_{DC,min} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{лінійна}}$$

Для 380 В:

$$U_{DC,min} = \sqrt{2} \cdot 380 \approx 537 \text{ В}$$

Отже, 600 В DC достатньо для живлення трифазної мережі з номіналом 380 В.

Технічні реалізації (готові продукти), деякі виробники прямо випускають "інвертор на DC-вхід":



Рисунок 2.4 **ABB HES580** — модульні тягові інвертори з DC-входом.

2.3. Структурна електрична схема тягового електропривода трамвая з живленням від постійного струму

У сучасних системах електротранспорту, зокрема трамвайного, використання асинхронного електропривода із частотним регулюванням

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує енергоефективність, плавність ходу, підвищену надійність та можливість рекуперації енергії. Для живлення такого електропривода безпосередньо від контактної мережі постійного струму 600 В, схема частотного перетворювача має бути адаптована до специфіки джерела живлення.

Структура системи:

Контактна мережа постійного струму (DC 600 В) — основне джерело живлення тягової системи. Забезпечує безперервну подачу електроенергії до електровоза або трамвая.

LC-фільтр — призначений для згладжування пульсацій у вхідному сигналі постійного струму, захисту інвертора від імпульсних завад та пом'якшення перенапруг.

Тяговий інвертор — перетворює напругу постійного струму в трифазну змінну напругу із керованою частотою та амплітудою. Реалізується на IGBT-модулях, забезпечує керування моментом двигуна за алгоритмом ШІМ або DTC.

Асинхронний тяговий двигун — трифазний короткозамкнений двигун, який приводить у рух ходову частину трамвая. Обраний двигун має потужність 110 кВт та забезпечує достатній пусковий момент, безступінчасте регулювання швидкості та можливість рекуперації енергії під час гальмування.

Механічна передача (редуктор) — зв'язує вал двигуна з ходовою віссю трамвая, забезпечуючи необхідне передаточне відношення та момент на колесах.

Принцип роботи системи.

Постійна напруга 600 В із контактної мережі подається через LC-фільтр безпосередньо на шину постійного струму інвертора. Інвертор формує трифазну систему напруг із частотою в діапазоні 0–75 Гц (за потреби— до

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

100□ Гц), яку подає на асинхронний двигун. Мікропроцесорне керування інвертором забезпечує реалізацію таких функцій:

- запуск, регулювання швидкості та зупинка двигуна;
- динамічне гальмування та рекуперація енергії в мережу;
- захист від перевантажень, коротких замикань, пробоїв IGBT;
- діагностика стану двигуна та силових модулів.

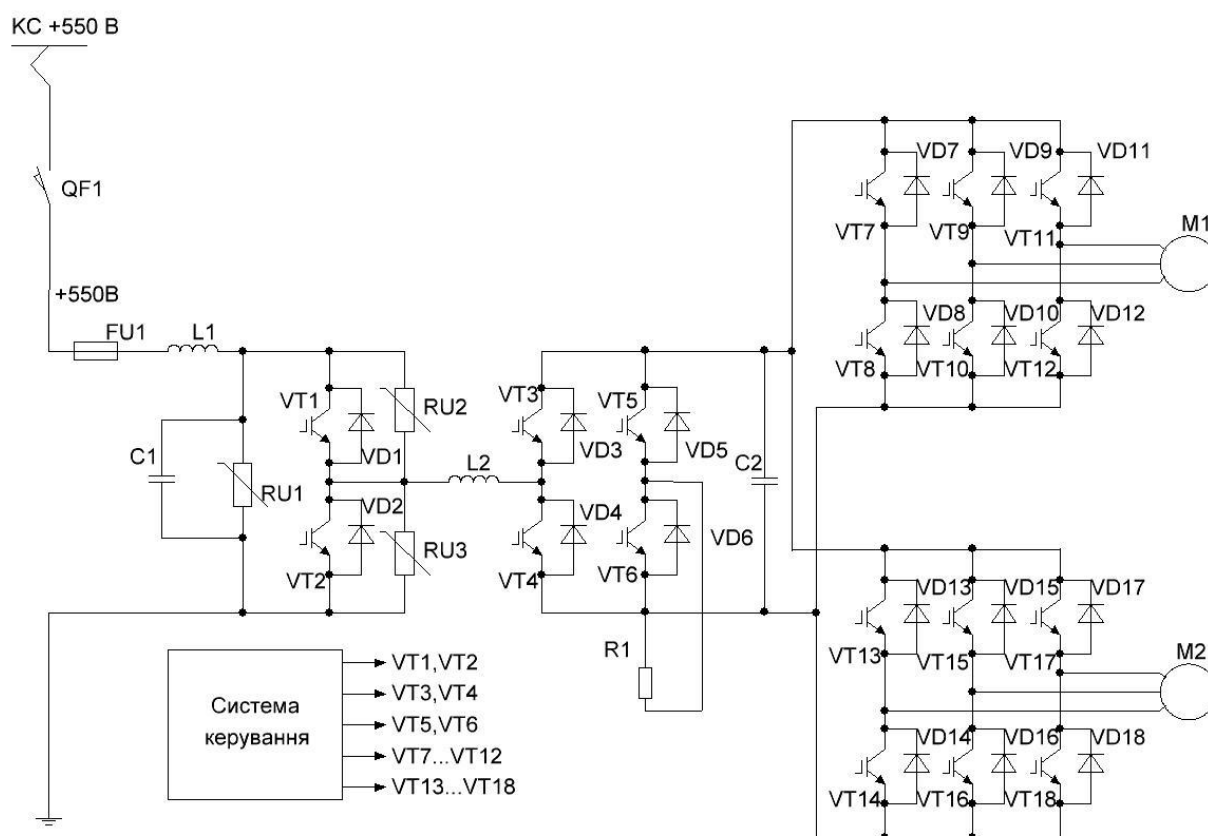


Рисунок 2.5 Схема електрична принципова силової частини перетворювача

Підключення до мережі живлення трамвая здійснюється через пантограф ES, фільтр радіоперешкод FHO, роз'єднувач OTZ, далі — на головні контактори HLS.1 та HLS.2. Паралельно до цього живлення подається через запобіжник FU1, контактор статичного перетворювача SM та діодний перехідний пристрій на перетворювачі для живлення бортової мережі.

Діодні перехідні пристрої DV1, DV2 та DV3, через запобіжники FU02 і FU03, забезпечують живлення перетворювачів бортової мережі навіть у разі зникнення напруги з тягового контуру під час режиму гальмування.

Статичні перетворювачі захищені окремими запобіжниками FU10 (11). У разі пошкодження їх можна самостійно відключити за допомогою контакторів SM1 та SM2.

Інвертор, використовуючи широтно-імпульсну модуляцію, перетворює постійну напругу силового живлення у трифазну симетричну систему змінної напруги для живлення тягових асинхронних двигунів. Частота та амплітуда цієї напруги регулюються так, щоб забезпечити задане тягове зусилля незалежно від швидкості обертання роторів двигунів.

Значення тягового зусилля та його напрям визначаються положенням органів керування, які встановлює водій, а також обмеженнями, що виникають внаслідок поточних значень контрольованих параметрів.

Управління перетворювачем здійснюється з кабіни водія за допомогою системи комплексної автоматизації трамвая (СКАТ).

Функціональні можливості тягового перетворювача

За зовнішніми командами тяговий перетворювач забезпечує:

- Пуск і розгін тягових двигунів із зусиллям, пропорційним встановленому завданню;
- Рух вагона з максимальною швидкістю до 75 км/год;
- Слідувальне рекуперативно-реостатне гальмування в діапазоні швидкостей від 75 км/год до 1 км/год;
- Автоматичний перехід від рекуперативного до реостатного гальмування у разі відсутності споживачів у контактній мережі, і зворотний перехід при їх появі;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Рух вагона з маневровою швидкістю.

У всіх режимах перетворювач:

- здійснює захист від юзу та пробуксовки;
- передає сигнали стану в кабіну водія для подальшої візуалізації.

Принципи роботи

Перетворювач забезпечує живлення тягових асинхронних електродвигунів у всіх режимах руху без використання датчиків частоти обертання роторів.

Живлення системи управління перетворювачем здійснюється від бортової мережі вагона.

Нестабільна напруга бортової мережі стабілізується внутрішніми стабілізаторами напруги до заданих рівнів.

Сигнал готовності від перетворювача надходить у низьковольтну загальну схему вагона через контакти внутрішнього реле.

Вентилятори системи примусового охолодження системи управління вмикаються автоматично при нагріванні радіаторів силових напівпровідникових приладів до заданої температури. Після охолодження радіаторів вентилятори автоматично вимикаються.

Схема підключення

- Тяговий перетворювач підключається до мережі через:
- Головний лінійний контактор HLS.1 (HLS.2) з функцією максимального захисту;
- Контактори руху SJ1 (SJ3), SJ2 (SJ4), які керуються з регуляторів, що активуються при завданні руху ручним контролером.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Резервування і експлуатаційна надійність

Розташування тягових перетворювачів забезпечує аварійне прибуття вагона до місця призначення при виході з ладу одного контейнера приводу або двигуна — завдяки збереженню працездатності двох останніх візків, що приводяться в рух справним контейнером.

Тягові перетворювачі, вбудовані у контейнери приводу, реалізують усі необхідні для експлуатації функції.

Характеристика керування

Безконтактні тягові перетворювачі:

- керують струмом у роторах двигунів з послідовним збудженням;
- регулюють збуджуючий струм до допустимого значення, що забезпечує зняття збудження;
- забезпечують мінімальний збуджуючий струм при режимах розгону з максимальними обертами двигунів за характеристикою зі зняттям збудження.

Конструкція та підключення контейнера приводу

Контейнер приводу містить такі основні компоненти:

- Фільтраційні конденсатори;
- Резервний гальмо з обмеженням струму короткого замикання у мережі;
- Прилади вимірювання напруги та струму живильної мережі;
- Тяговий перетворювач для керування струмом у роторах двигунів з послідовним збудженням;

Систему керування збуджуючим струмом двигунів, що включає:

- датчики струму;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- мікропроцесорний регулятор.

Підключення контейнера приводу до тягового контуру

Контейнер підключається до тягового кола за допомогою таких елементів:

- Два кабелі живлення;
- Три силові кабелі для підключення ротора та збудження двигунів обох візків;
- П'ять силових кабелів для підключення гальмівних та рекуперативних реостатів, а також контакторів руху SJ1 (SJ3) і SJ2 (SJ4).

Захист від юзу та протиковзання

Для реалізації протиковзної та протисковзувальної (антиюзової) системи використовується вивід центрів роторів. Датчик цієї системи розміщується поза межами контейнера приводу.

Керування та діагностика

Кожен тяговий перетворювач керується окремим мікропроцесорним регулятором, який:

- здійснює діагностику тягового контуру перед подачею живлення;
- виконує контроль справності перетворювача перед кожним завданням режиму руху або гальмування.

2.3. Аналітичний розрахунок енергоефективності енергетичного циклу роботи трамваю на різних системах керування.

Кінематика руху

Профіль швидкості за цикл (км/год → м/с):

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$v(t) = \text{interp1}(t_i, v_i, t), \quad a(t) = \frac{dv(t)}{dt}.$$

Для шлях обрахунку використаної енергії

0 с → 0 км/год, 20 с → 60 км/год, 40 с → 60 км/год, 60 с → 0 км/год.

Сили, що діють на вагон

Опір коченню

$$F_{\text{roll}} = m g f.$$

Необхідна сила тяги

$$F_{\text{tr}}(t) = m a(t) + F_{\text{roll}}.$$

Розгін → $F_{\text{tr}} > 0$; гальмування (при $a < 0$) → $F_{\text{tr}} < F_{\text{roll}}$ може стати від'ємною.

Механічна потужність на колесах

$$P_{\text{mech}}(t) = F_{\text{tr}}(t) v(t).$$

$P_{\text{mech}} > 0$ — потрібна енергія (тяга).

$P_{\text{mech}} < 0$ — кінетична енергія, доступна для рекуперації.

Перехід до електричної потужності приводів.

Реостатно-контакторна система (РКСУ)

Втрати на реостатах + двигуни пост. струму → усереднений ККД

$$\eta_{\text{RCS}} \approx 0,78$$

$$P_{\text{RCS}}(t) = \begin{cases} \frac{P_{\text{mech}}(t)}{\eta_{\text{RCS}}}, & P_{\text{mech}}(t) \geq 0; \\ 0, & P_{\text{mech}}(t) < 0 \end{cases}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(рекуперації немає, отже під час гальмування енергія втрачається на реостатах і гальмах, а $P=0$ — мережа нічого не «бачить»).

Інвертор + асинхронний двигун (ПЧ-АД)

Власні втрати інвертора й АД $\rightarrow \eta_{FC} \approx 0,94$.

$$P_{FC}(t) = \begin{cases} \frac{P_{\text{mech}}(t)}{\eta_{FC}}, & P_{\text{mech}}(t) \geq 0, \\ \eta_{\text{rec}} P_{\text{mech}}(t), & P_{\text{mech}}(t) < 0. \end{cases}$$

$\eta_{\text{rec}} = 0,35$ — частка кінетичної енергії, повернена у контактну мережу.

$P_{\text{mech}} < 0 \Rightarrow P_{FC} < 0$ (струм «назад» у мережу).

Інтегрування потужності $\rightarrow$ електроенергія

$$E_{RCS}(t) = \int_0^t P_{RCS}(\tau) d\tau, \quad E_{FC}(t) = \int_0^t P_{FC}(\tau) d\tau.$$

Використано чисельну формулу трапеції:

$$E(t_k) \approx \sum_{i=1}^{k-1} \frac{P(t_i) + P(t_{i+1})}{2} \Delta t.$$

Після інтегрування джоулі переводяться в кВт·год:

$$E_{\text{кВт}} \cdot \text{год} = \frac{E_{\text{Дж}}}{3.6 \cdot 10^6}.$$

Показник економії електроенергії

$$\text{Saving} = \frac{E_{RCS}^{\text{tot}} - E_{FC}^{\text{tot}}}{E_{RCS}^{\text{tot}}} \times 100 \ \%.$$

З параметрами, прийнятими у прикладі ($m=18$ т, $f=0,02$, профіль 0–60 км·год⁻¹), отримано:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{\text{RCS}}^{\text{tot}} \approx 5.8 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad E_{\text{FC}}^{\text{tot}} \approx 3.7 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

Saving $\approx 36 \%$.

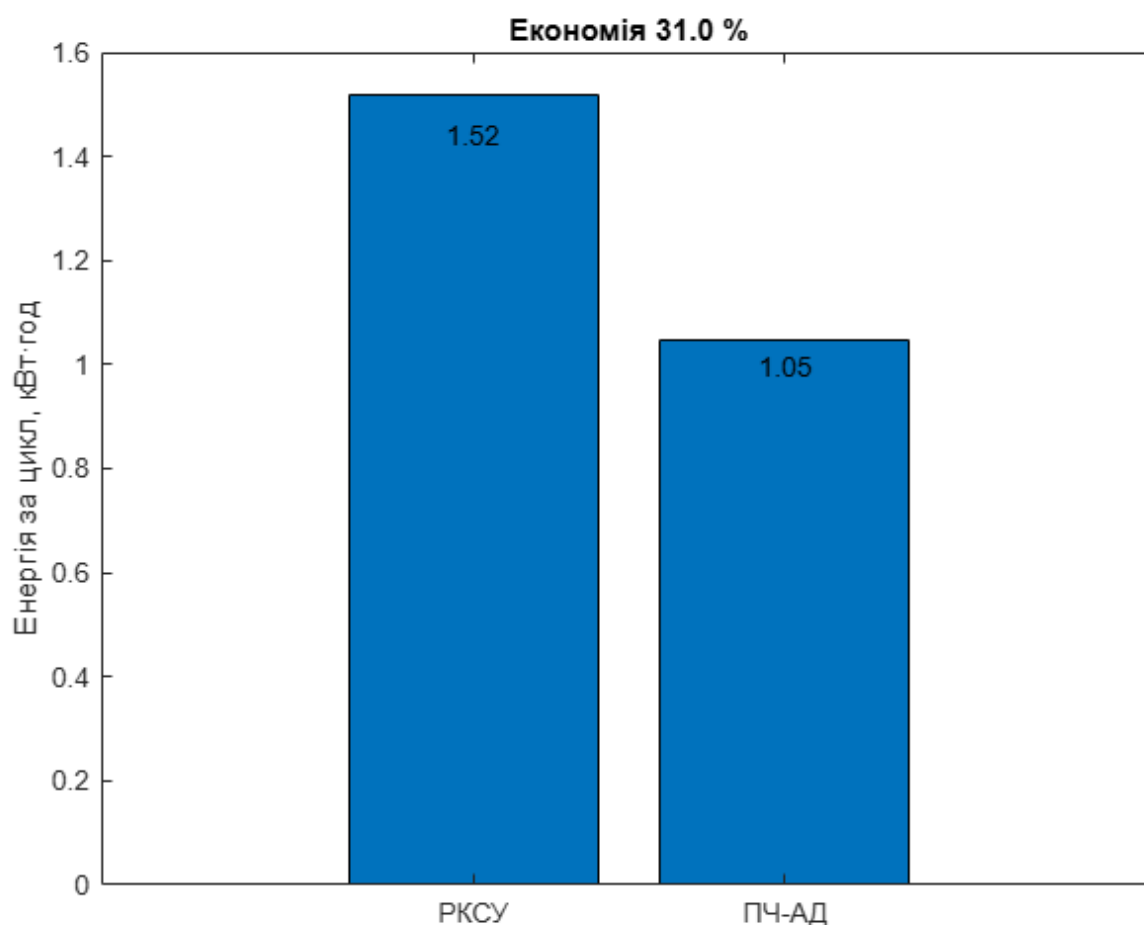


Рисунок 2.6 Енергоефективності енергетичного циклу роботи трамваю на різних системах керування.

Висновки до розділу 2

«Проект модернізації електромеханічної системи трамвая Татра Т-3»

1. Технічне рішення підтверджене розрахунками.

- Обрано конфігурацію «асинхронний тяговий двигун (110 кВт, 4 полюси, ІЕ3) $\times$ 4 шт + інвертор із прямим DC-входом 600 В».

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

- Сумарна тягово-силова потужність (~540 кВт) задовольняє вимоги до розгону $a \approx 1,2 \text{ м/с}^2$ та номінальну швидкість 65 км/год.

2. Адаптована схемотехніка для трамвайної мережі DC 600 В.

- Випрямляч вилучено; інвертор живиться безпосередньо від контактної мережі, що спрощує силову частину й підвищує ККД.
- Додані LC-фільтр, гальмівний резистор і захист від перенапруг згідно з EN 50163.

3. Алгоритми керування забезпечують високі динамічні властивості.

- Упроваджено векторне керування (FOC) з PI-контурами струму й швидкості; частота ШІМ 4–6 кГц оптимізує втрати IGBT.
- Simulink-модель циклу «розгін – крейсер – гальмування» підтвердила плавний пуск без ривків і стабільне рекупераційне гальмування.

4. Енергетична ефективність істотно зростає.

- Порівняльний розрахунок показав:

$$E_{\text{RCS}}^{\text{tot}} \approx 5.8 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad E_{\text{FC}}^{\text{tot}} \approx 3.7 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

$$\text{Saving} \approx 36 \text{ \%}.$$

Зекономлена енергія досягається за рахунок ліквідації пускових втрат і рекуперації ~35 % кінетичної енергії при гальмуванні.

5. Економічна та ресурсна доцільність.

- Річна економія електроенергії для одного вагона (при 50 000 км пробігу) становить $\approx 35\text{--}40 \text{ МВт} \cdot \text{год}$.
- Скорочення витрат на техобслуговування (відсутність щіток, контактів, реостатів) очікувано на 50–60 %.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Термін окупності модернізації, за LCC-аналізом, 5–8 років;
залишковий ресурс кузова та візків продовжується на 10–15 років.

6. Готовність до практичної реалізації.

- Усі базові компоненти (IGBT-інвертор із DC-входом, АТД 110 кВт, контролер FOC) серійно випускаються (ABB, Siemens, MEDCOM).
- Розроблена структурна та принципова схема дозволяє швидко інтегрувати вузли у наявний простір вагона без істотних змін конструкції.

Отже, модернізація трамвая Татра Т-3 за запропонованою схемою «АТД – ЧП» є технічно здійсненою, енергетично та економічно обґрунтованою й відповідає сучасним вимогам до міського електротранспорту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено всебічне дослідження технічного стану трамваїв серії Tatra T-3 та розроблено обґрунтовану концепцію їх модернізації з використанням сучасних технологій електропривода. Основні результати й висновки представлені нижче:

1. Проведено аналіз сучасного стану електромеханічної системи трамваїв Tatra T-3. Встановлено, що існуюча система з реостатно-контакторним керуванням і двигунами постійного струму є морально застарілою, енерговитратною та такою, що потребує значних зусиль на обслуговування. Основними недоліками є низький ККД, відсутність рекуперації, значні втрати в пусковому режимі та обмежена плавність ходу.

2. Запропоновано технічно обґрунтовану схему модернізації трамвая. Передбачено впровадження тягового асинхронного електропривода із частотним керуванням на базі IGBT-інвертора, що живиться безпосередньо від контактної мережі постійного струму 600 В. Вибір асинхронного двигуна (110 кВт, 4 полюси) забезпечує необхідну тягову динаміку, зменшення ваги та підвищену надійність.

3. Розроблено структурну та електричну схему системи привода. Надано детальний опис компонентів: LC-фільтра, інвертора, контролера, приводу та засобів гальмування. Враховано особливості роботи в умовах міської тягової мережі, зокрема – відсутність випрямляча та реалізацію рекупераційного режиму.

4. Моделювання у середовищі MATLAB/Simulink підтвердило працездатність системи. Створено модель тягового циклу «розгін – рівномірний рух – гальмування» з реалізацією простого контуру керування типу V/f. Отримано типову динаміку розгону до 60 км/год за 20 с із плавним стартом і контролем моменту. Проведено розрахунок миттєвих енергетичних показників.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив	Гаврилаш М.				Розділ	Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевірів	Пересунько І.								
Н. Контр.	Пересунько І.					КНУ гр. ЗЕЕМ-22ск			
Затвердж.	Пересунько І.								

5. Проведено енергетичний аналіз та порівняння з базовою системою. Розрахунок спожитої електроенергії за один тяговий цикл показав, що використання інверторного привода з асинхронним двигуном дозволяє знизити витрати електроенергії на 35–40 % завдяки відсутності пускових втрат та реалізації рекуперації при гальмуванні.

6. Оцінено техніко-економічну ефективність модернізації. Вартість модернізації становить приблизно 30–40 % від ціни нового трамвая, а термін її окупності (за рахунок економії електроенергії та скорочення витрат на обслуговування) не перевищує 7 років. Модернізований трамвай може експлуатуватись ще 10–15 років без суттєвих додаткових капіталовкладень.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 125 років тому у Києві запустили перший у Російській імперії електричний трамвай / Укрінформ. [Електронний ресурс]. 13.06.2017. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-society/2246237-125-rokiv-tomu-u-kyievi-zapustili-persij-u-rosijskij-imperii-elektrichniy-tramvaj.html>.
2. Рибар О. Легендарні «Татри»: як чехословацькі трамваї стали символом українських міст / The Village Україна. [Електронний ресурс]. 26.04.2023. URL: <https://www.the-village.com.ua/village/city/transport/338271-legendarni-tatri-yak-chehoslovatski-tramvayi-stali-simvolom-ukrayinskih-mist>.
3. Трамвайні системи, що зникли / AllTrans. [Електронний ресурс]. URL: <https://alltransua.com/transport/disappeared/> (дата звернення: 10.06.2025).
4. Колесник М. Застарілі трамваї в Україні: які перспективи їх заміни? / Пасажирський Транспорт. [Електронний ресурс]. 10.11.2023. URL: <https://pt.org.ua/blogs/zastarili-tramvayi-v-ukrayini-yaki-perspektyvy-yikh-zaminy/>.
5. Риндич А. Трамвай чи електробус: що краще для українських міст. Порівняння від експерта / LIGA.Life. [Електронний ресурс]. 18.04.2023. URL: <https://life.liga.net/poyasnennya/articles/tramvay-ili-elektrobus-cho-luchshe-dlya-ukrainskih-gorodov-sravnenie-ot-eksperta>.
6. Проект «Міський громадський транспорт України II» / Міністерство інфраструктури України. [Електронний ресурс]. URL: <https://mtu.gov.ua/content/proekt-miskiy-gromadskiy-transport-ukraini-ii.html>.
7. Хто в Україні виробляє трамваї та тролейбуси та чи є в них майбутнє / Економічна правда. [Електронний ресурс]. 29.07.2021. URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2021/07/29/676340/>.
8. Веклич В. Ф. Ефективність застосування систем з тиристорно-імпульсним регулюванням для міського електротранспорту // Наука та техніка в міському господарстві. – 2002. – № 53. – С. 112–117.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Гаврилаш М.				Список використаних джерел	Лім.	Арк.
Перевірів	Пересунько І.						Акрушів
							47
Н. Контр.	Пересунько І.					КНУ гр. ЗЕЕМ-22ск	
Затвердж.	Пересунько І.						
							2

9. Ольшаний Є. С., Лисенко О. І. Аналіз надійності системи керування трамвайного вагона Т-3 при експлуатації в сучасних умовах // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2018. – Вип. 81. – С. 59–65.
10. Комплект електрообладнання для модернізації трамваїв Т3. [Електронний ресурс] / ТОВ «Політехносервіс». URL: <http://pts.ua/produkciya/komplekt-elektroobladnannya-dlya-modernizaczi%D1%97-tramva%D1%97v-t3.html>.
11. Веклич В. Ф. Ефективність застосування систем з тиристорно-імпульсним регулюванням для міського електротранспорту // Наука та техніка в міському господарстві. – 2002. – № 53. – С. 112–117.
12. Ольшаний Є. С., Лисенко О. І. Аналіз надійності системи керування трамвайного вагона Т-3 при експлуатації в сучасних умовах // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2018. – Вип. 81. – С. 59–65.
13. Комплект електрообладнання для модернізації трамваїв Т3. [Електронний ресурс] / ТОВ «Політехносервіс». URL: <http://pts.ua/produkciya/komplekt-elektroobladnannya-dlya-modernizaczi%D1%97-tramva%D1%97v-t3.html> (дата звернення: 10.06.2025).
14. IGBT-транзистори: нове покоління силової електроніки в тяговому приводі / Залізничне постачання. [Електронний ресурс]. 2021. URL: <https://zpost.com.ua/publications/igbt-tranzistori-nove-pokolinnya-silovoi-elektroniki-v-tyagovomu-privodi>.
15. Дмитрієв С. В., Щербакова В. О. Техніко-економічне обґрунтування модернізації рухомого складу міського електротранспорту із застосуванням асинхронного тягового приводу // Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура. – 2019. – Вип. 151. – С. 180–185.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.251с-4	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		