Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОЇЗДІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи

КРМ.273.14.01.25.12 ПЗ

Розробив студент групи 214-ЕЕ-Д25
спеціальності 273 освітньої програми
«Електровози та електропоїзди»
Сергій ШЕВЧЕНКО

Керівник: доцент, канд. техн. наук
Юрій СЕМЕНЕКНО

Рецензент: д-р. техн. наук
Олександр ПЛАХТІЙ

2025

Український державний університет залізничного транспорту
Факультет механіко-енергетичний
Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Другий (магістерський) рівень вищої освіти
Спеціальність 273 «Залізничний транспорт»
Освітня програма «Електровози та електропоїзди»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук
_____ М.М. Бабаєв
(підпис)
«30» грудня 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Шевченка Сергія Олександровича

1. Тема «Дослідження систем тягового електроприводу поїздів метрополітену»
Керівник: Семененко Юрій Олександрович, доцент, канд. техн. наук,
затверджені розпорядженням по механіко-енергетичному факультету
від «24» лютого 2025 року КР № 14.
2. Строк подання студентом закінченої роботи «25» грудня 2025 року.
3. Вихідні дані: Тяговий перетворювач електровоза змінного струму з асинхронними двигунами;
номінальна напруга мережі (рейки), В – 750;
номінальна напруга на виході тягової підстанції, В – 825.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: 1. Порівняльний аналіз систем управління тяговим електроприводом вагонів метрополітену з різними видами тягових двигунів. 2. Порівняльний аналіз систем ТЕП вагонів метрополітену постійного струму з тиристорно-імпульсним і дискретним реостатним управлінням. 3 Система тягового електроприводу для вагонів метрополітену. 4 Тягово-енергетичні показники вагонів метро з різними системами тягового електроприводу. 5 Визначення економічного ефекту від застосування тягових перетворювачів у системі керування вагонів метрополітену.
5. Перелік ілюстративного матеріалу:
1 Титульний аркуш – один слайд;
2 Схема силових ланцюгів вагонів метрополітену 81-717/714 – один слайд;
3 Схема силових ланцюгів комплекту електроустаткування з асинхронними тяговими машинами – один слайд;
4 Схема силових ланцюгів вагона метро з тиристорно-імпульсним управлінням – один слайд;
5 Принципи роботи системи силових ланцюгів ЕРС – один слайд;

6 Принципи роботи системи силових ланцюгів ЕРС з тиристорно-імпульсним управлінням – один слайд;
7 Принципова силова схема вагона метрополітену з системи незалежного збудження тягових машин та тиристорно-реостатного контролера – один слайд;
8 Графіки зміни струму якоря (а), струму збудження (б) і швидкості руху вагона (в) під час роботи системи автоматичного регулювання для стабілізації струму після виходу на автоматичну характеристику – один слайд;
9 Тягова характеристика і побудова кривої споживаного поїздом струму – один слайд;
10 Залежність діючих сил на поїзд в режимах тяги, гальмування та вибігу від швидкості руху – один слайд;
11 Економічний ефект від впровадження розробки – один слайд;
12 Висновки – один слайд.

6 Консультанти окремих розділів

Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Уткіна Ю.М., доцент, к.е.н.		

7 Дата видачі завдання «01» жовтня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
Порівняльний аналіз систем управління тяговим електроприводом вагонів метрополітену з різними видами тягових двигунів	1.10-10.10	
Порівняльний аналіз систем ТЕП вагонів метрополітену постійного струму з тиристорно-імпульсним і дискретним реостатним управлінням	11.10-30.10	
Система тягового електроприводу для вагонів метрополітену. Тягово-енергетичні показники вагонів метро з різними системами тягового електроприводу	01.11-20.11	
Визначення економічного ефекту від застосування тягових перетворювачів у системі керування вагонів метрополітену	21.11-25.12	

Студент _____ Сергій ШЕВЧЕНКО
(підпис)

Керівник _____ Юрій СЕМЕНЕНКО
(підпис)

РЕФЕРАТ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 12 слайдів презентації, 108 аркушів пояснювальної записки формату А4, що включає 25 рисунків, 9 таблиць, 11 літературних джерел.

Ключові слова: АСИНХРОННІ ДВИГУНИ, ТЯГОВІ МАШИНИ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ІМПУЛЬСНЕ УПРАВЛІННЯ, АСИНХРОННИЙ ТЯГОВИЙ ПРИВОД, БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ.

Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси в тягових електроприводах електропоїздів метрополітену з асинхронними двигунами.

Метою дослідження є оцінка техніко-економічної ефективності різних систем тягового електроприводу для використання на електропоїздах метрополітенів.

У магістерській роботі проведено порівняльний аналіз систем управління тяговим електроприводом вагонів метрополітену з різними видами тягових двигунів, де ретельно розглядається аналіз переваг та недоліків систем керування тягового електроприводу з асинхронними тяговими машинами. Виконаний також порівняльний аналіз систем тягового електроприводу вагонів метрополітену постійного струму з тиристорно-імпульсним управлінням і дискретним реостатним управлінням, показані переваги першого.

Представлена розробка система тягового електроприводу для вагонів метрополітену. Запропоновані можливі покращення показників тягового електроприводу вагонів метрополітену, їх особливість, доцільності та ефективність запропонованої системи. Також були розглянуті питання тягово-енергетичних показники вагонів метрополітену з різними системами тягового електроприводу, де продемонстрована методика та технічні дані.

Виконаний також розрахунок економічної ефективності запропонованого використання силових перетворювачів у системі тягового асинхронного електроприводу електропоїздів метрополітену.

ABSTRACT

This qualifying work includes 12 presentation slides, 108 sheets explanatory note A4, including 25 figures, 9 tables, 11 sources informations.

Keywords: ASYNCHRONOUS MOTORS, TRACTION MACHINES, CONTROL SYSTEM, PULSE CONTROL, ASYNCHRONOUS TRACTION DRIVE, BIPOLAR TRANSISTORS.

The object of the research is electromagnetic processes in traction electric drives of subway electric trains with asynchronous motors.

The purpose of the research is assessment of the technical and economic efficiency of various traction electric drive systems for use on electric subway trains.

The master's thesis has conducted a comparative analysis of traction electric drive control systems for subway cars with different types of traction motors, where the analysis of the advantages and disadvantages of traction electric drive control systems with asynchronous traction machines is carefully considered. A comparative analysis of traction electric drive systems for subway cars with direct current thyristor-pulse control and discrete rheostat control is also performed, the advantages of the former are shown.

The development of a traction electric drive system for subway cars is presented. Possible improvements in the traction electric drive performance of subway cars, their features, feasibility and efficiency of the proposed system are proposed. The issues of traction and energy performance of subway cars with different traction electric drive systems were also considered, where the methodology and technical data are demonstrated.

A calculation of the economic efficiency of the proposed use of power converters in the traction asynchronous electric drive system of electric subway trains was also performed.

Зміст

Вступ…….…….. 8
1 Порівняльний аналіз систем управління тяговим електроприводом вагонів метрополітену з різними видами тягових двигунів ……..…….. 9
1.1 Аналітичний огляд існуючих систем керування тяговим електроприводом електрорухомого складу ……..…… 9
1.2 Аналіз переваг та недоліків систем керування ТЕП з дискретним реостатним управлінням та тяговими машинами постійного струму …… 13
1.3 Аналіз переваг та недоліків систем керування ТЕП з асинхронними тяговими машинами (АТМ) …… 16
2 Порівняльний аналіз систем ТЕП вагонів метрополітену постійного струму з тиристорно-імпульсним і дискретним реостатним управлінням…….....23
2.1 Порівняльна оцінка ефективності систем ТЕП з ДРУ та ТІУ ……..…..... 28
2.2 Контактна апаратура і показники електрообладнання …… 33
2.3 Тягові і гальмівні характеристики …….. 35
2.4 Вплив на тягові властивості …… 37
2.5 Споживання енергії на тягу поїздів …… 38
2.6 Проблема ослаблення поля……..…… 41
3. Система тягового електроприводу для вагонів метрополітену……..……. 45
3.1 Можливості покращення показників ТЕП вагонів метрополітену...…….45
3.2 Особливість доцільності та ефективності запропонованої системи ТЕП для вагонів метрополітену ……..…… 48
3.3 Електромагнітні, електромеханічні та механічні процеси в ТЕП з незалежним збудженням тяговим машин …….. 52
3.4 Порівняльний аналіз тягово-енергетичних характеристик запропонованої системи ТЕП на дослідних вагонах метрополітену……... 62

					КРМ.273.14.01.25.12 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Шевченко С.О.			Дослідження систем тягового електроприводу поїздів метрополітену	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Семененко Ю.О.					6	
Реценз.		Плахтій О.А.				УкрДУЗТ		
Н. контр.		Семененко Ю.О.						
Затверд.		Бабаєв М.М.						

4 Тягово-енергетичні показники вагонів метро з різними системами тягового електроприводу 72
4.1 Методика та технічні дані для тягово-енергетичних розрахунків 72
4.2 Тягово-енергетичні розрахунки вагонів метро з ТМ ПТ 74
5 Визначення економічного ефекту від застосування тягових перетворювачів у системі керування вагонів метрополітену..... 95
5.1 Коротка характеристика запропонованого рішення 95
5.2 Розрахунок економічного ефекту 95
Висновок.....105
Список використаних джерел.....107
Додаток А 109

Вступ

Вирішення транспортної проблеми є постійною та актуальною за у багатьох великих містах світу, у тому числі і в Україні. Однак, у транспортної системи в містах мільйонниках України є багато недоліків: застаріла транспортна інфраструктура, де транспортні артерії міст не відповідають стандартам рівня в житлових районах. Ефективність та надійність роботи метрополітену вирішальною мірою визначаються експлуатаційними характеристиками поїздів, які, у свою чергу, визначаються їх відповідними показниками (вартість виготовлення, витрати на ремонти та обслуговування, термін служби, питома витрата енергії та надійність роботи тощо). Найбільший вплив на ці показники має система тягового електроприводу.

Метою виконаних у магістерській роботі досліджень є оцінка техніко-економічної ефективності різних систем тягового електроприводу для використання на електропоїздах метрополітенів.

Дослідження проводилися з використанням теорії електричної тяги, теорії тягового електроприводу, теорії автоматичного керування та методів обробки даних експлуатації. Для виконання всіх тягово-енергетичних та економічних розрахунків використовувалися комп'ютерні програми.

Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у кваліфікаційній магістерській роботі, підтверджується задовільною збіжністю результатів аналітичних розрахунків та комп'ютерних моделей з результатами випробувань та у відомих роботах,

На сьогоднішній день тяговий електропривод для вагонів метрополітенів остаточно ще не обрано, тому розробка підходів до обґрунтування вибору типу вагонів з оптимальним типом тягового електроприводу для ліній метрополітену, що будуються і проектуються, за тягово-енергетичними та економічними показниками є актуальним завданням, що має практичне значення.

Порівняльний аналіз систем управління тяговим електроприводом вагонів метрополітену з різними видами тягових двигунів

Аналітичний огляд існуючих систем керування тяговим електроприводом електрорухомого складу

Багаторічна історія розвитку тяговим електроприводом (ТЕП) електрорухомого складу завжди відбувалася на фоні конкуренції між двома системами – приводом із тяговими електродвигунами (ТЕД) постійного та змінного струму [4].

Системи керування ТЕП електрорухомого складу неодноразово змінювалися, удосконалювалися, зберігаючи, у своїй наступність і загальні конструктивні рішення. Наприклад, система реостатного пуску з колекторними тяговими машинами (КТМ) постійного струму застосовувалася на перших вагонах метрополітену. 81-715/716 та 81-718/719) та кілька модифікацій вагонів типу Е та мод. 81-717/714 (табл. 1) [6]. При пуску послідовно підключений до ланцюга живлення тягових машин (ТМ) реостат поступово виводиться за підтримки постійного струму і, відповідно, прискорення ЕРС, після чого розгін продовжується за природними характеристиками двигунів, а потім відбувається ослаблення магнітного потоку обмоток збудження. Це відбувається за допомогою спеціальних електромеханічних пристроїв – групового реостатного контролера (або прискорювача) із серводвигуном, реле прискорення-гальмування, контакторів. Деякі схеми також передбачають перегрупування схем з'єднання ТМ, з послідовним на послідовно-паралельним – для зниження реостатних втрат.

Розвиток напівпровідникової техніки уможливило застосування імпульсного регулювання напруги на ТМ, в зокрема на метропоїздах з вагонів типу Еі (з тиристорно-імпульсним системами управління ТИСУ) і вагонів типу Еїр (у ній поряд з безреостатним пуском було застосовано рекуперативно-реостатне гальмування ТМ із віддачею електричної енергії гальмування в

контактну мережу) (табл. 1) [4]. У цьому випадку виключаються із схеми пускові реостати, а напруга на двигунах регулюється за допомогою імпульсного перетворювача напруги, виготовленого із застосуванням силових тиристорів або транзисторів.

Таблиця 1.1 – Вагони метрополітенів з тяговим приводом постійного струму (ТП ПТ) за даними експлуатації

Модель вагонів	Середня маса тари вагона, т	Тип двигуна постійного струму	Номінальна потужність двигуна, кВт	Маса тягового двигуна, кг	Питома пускова потужність, кВт/т
		ДК-117А			
81-717М/714М		ДК-117А			
/		ДПТ			
		ДК-117А			
		ДК-117А			
		ДК-120			

Перші розробки системи тиристорного імпульсного управління (ТІУ) гіпотетично вважалося, що перехід з реостатно-контакторного на безконтакторне тиристорне управління докорінно змінює умови роботи електрообладнання та управління ЕРС постійного струму, значно покращуючи його тягово-експлуатаційні якості та підвищуючи економічну ефективність електричної тяги.

Однак, практичне використання імпульсного керування не дає тих результатів, які очікувалися теоретично.

При використанні на моторних вагонах ТІУ поступається ДРУ за багатьма показниками (тягові та гальмівні властивості, споживання енергії, ефективність рекуперації тощо) та заміна ДРУ на ТІУ призводить до подорожчання та збільшення маси електроустаткування та не підвищує його надійність.

Наступним щаблем розвитку систем управління ТЕП стало застосування асинхронних тягових машин (АТМ), з живленням від перетворювачів, інверторів, що перетворюють постійну напругу на трифазну синусоїдальну з регульованою частотою і величиною напруги. Застосування АТМ дозволяє відмовитися від колекторних ТЕД, що потребують великих обсягів обслуговування, проте застосовано складну електронну систему управління.

На залізниці багатьох розвинених країн світу поставляється ЕРС із АТМ. Більше 80% світового ринку ЕРС забезпечують чотири великі фірми-постачальники: Bombardier, Siemens, Alstom та Hitachi. За останні роки за їх участю було створено велику кількість рухомого тягового складу для різних систем електричної тяги [3].

Протягом останніх 30 років в Україні проведено велику кількість випробувань щодо визначення тягово-енергетичних показників різних систем ТЕП електрорухомого складу (табл. 2) [6]. Накопичено досвід створення приводу з АТМ та застосуванням інверторів напруги, який можна використовувати при оцінці доцільності створення ЕРС.

Основною декларованою перевагою систем приводу з АТМ вважається відмова від колекторних двигунів, вимагають постійного обслуговування щітково-колекторного вузла, а також складніших у виробництві та капітальному ремонті. Також перевагою вважається відмова від пуску за допомогою реостатів, коли частина енергії марно розсіюється на них у вигляді тепла. Однак варто врахувати, що система управління АТМ складніша і вимагає кваліфікованого персоналу для обслуговування, а також обладнання спеціальних ділянок з діагностичними стендами. Потрібно брати до уваги і високу вартість силових перетворювачів, особливо силових ключів (зазвичай це транзистори з ізольованим затвором IGBT) [7].

Доцільність застосування ЕРС тієї чи іншої типу ТЕП визначається експлуатаційними вимогами.

Для ЕРС із швидкостями руху понад 180 км/год практично безальтернативним є безколекторний тяговий привід, оскільки високі

швидкості недоступні для ЕРС із колекторними тяговими машинами (КТМ), оскільки окружна швидкість якоря у них не може перевищувати 65 - 70 м/с або 60 м/с на поверхні колектора. Важливою перевагою при використанні тягових безколекторних у швидкісному русі є і їх висока питома потужність. Для ЕРС зі швидкостями менше 180 км/год (тобто метро) необхідні експлуатаційні показники може бути забезпечені ЕРС з КТМ [3].

Таблиця 1.2 – Вагони метрополітенів з асихронними тяговими приводами (АТП) за даними експлуатації

Модель вагонів	Середня маса тари вагон, т	Тип асинхр. тягового двигуна	Номінальна потужність двигуна, кВт	Маса одного тягового двигуна, кг	Питома пускова потужність, кВт/т
81-720А/721А		4ЕРА 1832В			
81-720Х/721Х		ЕР0-К60			
		4ЕРА 1832В			
		ТАД 280 М4У2			
		М1_ 3844 К/4			
		ДАТЕ-170-4У2			
		МШ 3839 К/4			
81-760А/761А		ДАТЕ-170-4У2			
		ЕР0-К60			

Нині немає однозначної відповіді питання, який тип ТЕП краще використовувати на ЕРС. У кожній системі ТЕП є свої плюси та мінуси. Тому нижче найбільш доцільним є детальне порівняння систем управління ТЕП з різними видами ТД. Порівняння виконано з урахуванням досвіду експлуатації даних видів ЕРС експлуатуючими підприємствами міського електротранспорту.

Аналіз переваг та недоліків систем керування ТЕП з дискретним реостатним управлінням (ДРУ) та тяговими машинами постійного струму

Розглянемо схему силових ланцюгів вагона метрополітену 81-717/714, подану на рис. 1.1.

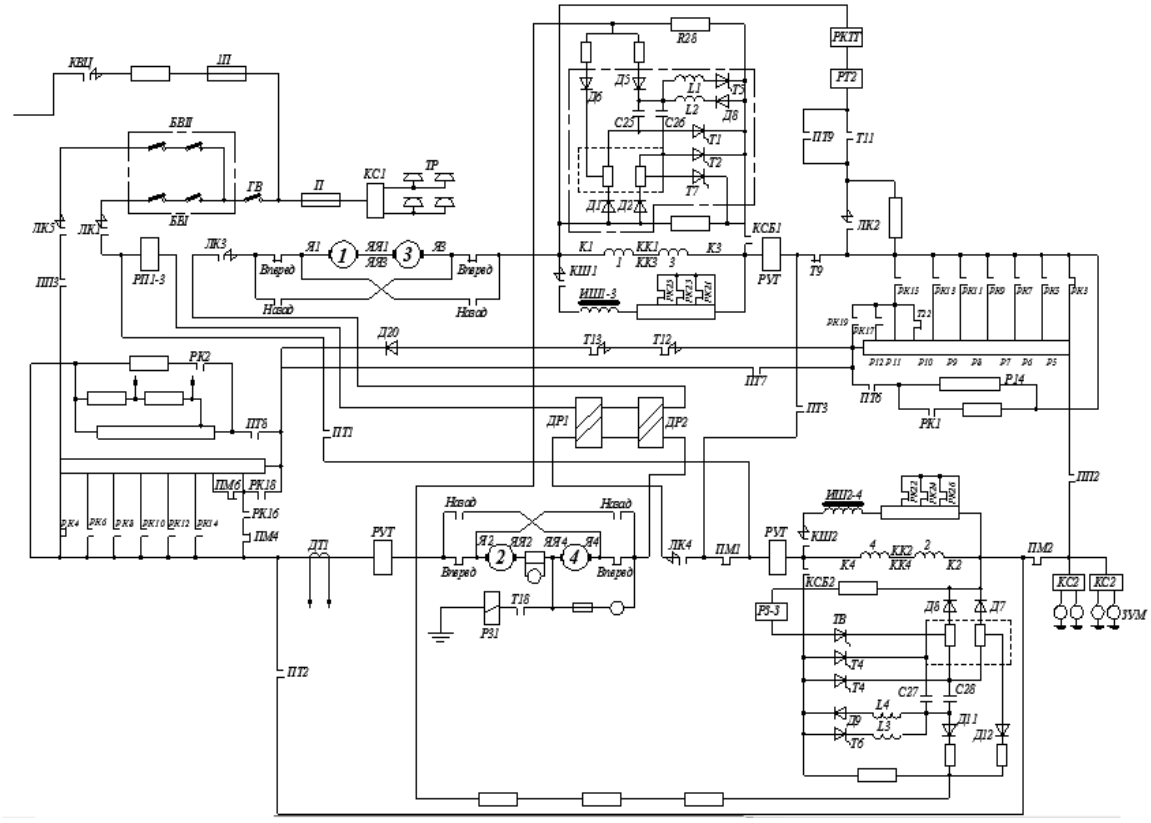


Рисунок 1.1 - Схема силових ланцюгів вагона метрополітену 81-717/714

Основними апаратами системи є групові контролери, один з яких називається перемикачем положень (ПП), а інший реостатним контролером (РК). З допомогою першого виробляється перемикання схеми на режим хода і гальма, а також з послідовного на паралельне з'єднання ТМ, а з другого - регулювання опорів в ланцюги ТМ при пуску і гальмування.

Пуск вагона здійснюється шляхом поступового виведення пускових опорів.

При встановленні контролера машиніста на гальмівні позиції включаються лінійні контактори ЛК3, ЛК4 та ЛК2.

Переваги систем ТЕП з ДРУ і ТМ ПТ

Останнім часом серед частини фахівців утвердилося недостатньо обґрунтоване переконання про безальтернативність використання на ЕПМ тільки АТМ, що забезпечує їм вирішальні та безперечні переваги перед ТЕП з ДРУ та ТМ ПТ. При цьому основним і на перший погляд безперечним аргументом є зіставлення отриманих в експлуатації енергетичних показників дійсно, архаїчної системи ТЕП з ДРУ і без рекуперативного гальмування, що використовується в метрополітені практично без принципових змін, з створеної з використанням останніх досягнень перетворювальної техніки системою ТЕ.

Некоректність такого підходу до оцінки перспективності альтернативних систем ТЕП була показана у [2]. Тим часом, наявні експериментальні дані та результати теоретичних досліджень показують, що ТЕП з ТМ ПТ має великі резерви поліпшень усіх його показників [99].

В даний час у всьому світі широко впроваджується ЕРС з безколекторними ТМ, переважно АТМ, так як вони мають багато переваг:

- Простота передачі енергії і управління режимами його роботи при за допомогою зміни напруги на ТЕД та потоку збудження, не потрібно складний перетворювач;
- Простота схемних рішень: система управління не містить складних в діагностики електронних компонентів і не вимагає дорогих діагностичних стендів для пошуку несправностей і дуже високою кваліфікації обслуговуючого персоналу;
- Висока загальна надійність системи при умови своєчасного технічного обслуговування. Досягається завдяки простоті схем, мінімізації елементів та їх уніфікації між собою;
- Широкий і безступінчастий діапазон регулювання частоти обертання

- Низька вартість комплекту електроустаткування. Завдяки відсутності дорогої електроніки вартість ЕРС виявляється нижче за аналогічне, але з асинхронними двигунами або імпульсним керуванням. Також значно нижча вартість запасних частин до системи ТЕП.

Недоліки систем ТЕП з ДРУ і ТМ ПТ

Система управління ТЕП з ДРУ і ТМ ПТ має та недоліки:

- Підвищена витрата енергії, яка витрачається на пуск ЕРС, оскільки частина енергії виділяється у вигляді тепла на пускових реостатах. Виділення енергії на реостатах можна зменшити вдвічі, застосувавши перегрупування ТМ, але це додатково ускладнює силову схему та вимагає збільшення контакторів;
- Силові електромеханічні апарати вимагають регулярного обслуговування, зачистки контактів від нагару, своєчасного оновлення контактних пар тощо;
- Велика кількість механічних вузлів, які потребують уваги. Наприклад, груповий реостатний контролер, його привід, які мають вільно обертатися, без заїдань;
- Можливий розкид тягових зусиль між ТМ і, відповідно, різниця струмів між ними через групове живлення всіх ТМ від одного джерела. Характеристики ТМ різняться між собою, залежно від властивостей активних матеріалів, різниці активних опорів обмоток, особливостей збирання на заводі-виробнику та при проходженні ремонтів, а також через різницю діаметрів бандажів коліс на різних осях. В результаті деякі машини можуть виявитися недовантаженими, інші, навпаки, перевантаженими машинами на кожен вагон повинні підбиратися за характеристиками з використанням спеціального діагностичного стенду, що ускладнює технологію ремонту;
- Існує обмеження максимальної частоти обертання КТМ, пов'язане з умовами виконання комутації в щітково-колекторному вузлі, нагріванні колектора в результаті тертя, зносу щіток і механічною міцністю;

- Колекторним тяговим машинам необхідно регулярно проводити заміну щіток, що зношуються, рідше - шліфування і продорожку колектора;
- Колекторні тягові машини чутливі до вологи, особливо її попадання на колектор, що може викликати міжламельні замикання і круговий вогонь на колекторі, зниження електричної міцності ізоляції. Волога в ТМ може потрапити зі шляхів під час атмосферних опадів та у процесі миття рухомого складу. Найбільше піддаються двигуни з самовентиляцією.

Аналіз переваг та недоліків систем керування ТЕП з асинхронними тяговими машинами (АТМ)

У парку залізниць нині переважають ЕРС з електричними передачами постійного та змінного-постійного струму. Основним елементом енергетичного ланцюга в таких ЕРС є КТМ постійного струму, електромеханічна характеристика якого найкраще задовольняє умови тяги. Однак КТМ мають деякі вищевказані недоліки. Тому в наукових організаціях та промисловості інтенсивно ведуться роботи з використання безколекторних електродвигунів, у тому числі АТМ у різних видах ЕРС.

Таблиця 1.3 – Склад комплекту асинхронного тягового приводу КАТП-2

Найменування обладнання	Кількість, од.	Маса за 1 шт., кг	Маса всього вагона, кг
Двигун асинхронний тяговий ДАТЕ-170-4 або Двигун асинхронний тяговий ТА280М4			
Контейнер тягового інвертора КТІ-2. Гальмівний резистор			
Дросель мережевого фільтра ДСФ-1Л або Дросель мережевого фільтра ДСФ-1Н			
Датчик частоти обертання двигуна			
Сумарна маса комплекту		6277 (кг)	

До складу тягового електроустаткування вагонів входять комплекти асинхронного тягового приводу КАТП-2 з автономним інвертором напруги на IGBT-модулях та окремі силові блоки (Таблиця 3).

Комплект електроустаткування отримує живлення від контактної мережі постійного струму (750В) при нижньому струмозніманні з контактної рейки через струмоприймач та забезпечує різні режими роботи поїзда метро [8].

Схема силових ланцюгів комплекту електроустаткування АТМ наведено на рис 2. У режимі тяги компоненти силового ланцюга перетворять напругу мережі постійного струму, що знімається з контактної рейки, на 3-фазну напругу з регульованою амплітудою і частотою для харчування АТМ. Також компоненти силовий ланцюг використовується для забезпечення режиму реостатного гальмування. Робота схеми силових ланцюгів вагонів з АТМ у [6].

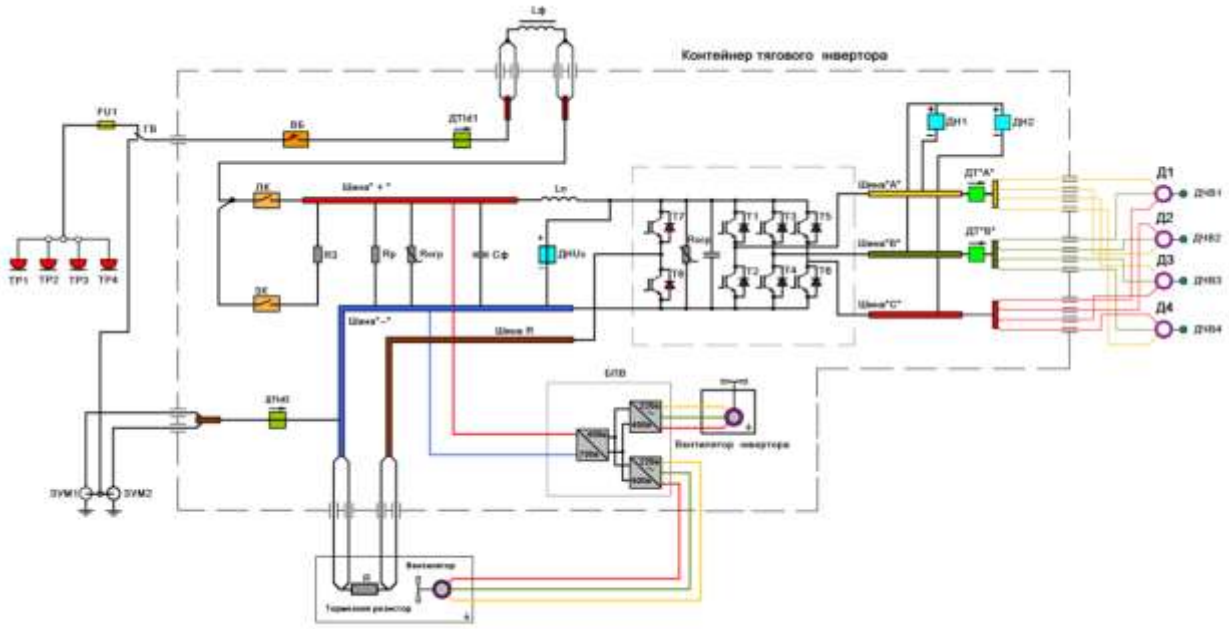


Рисунок 1.2 - Схема силових ланцюгів комплекту електроустаткування АТМ

Переваги систем ТЕП з АТМ

Фактично з перших етапів електрифікації залізниць безперервно ведеться створення ЕРС з АТМ [6]. Основними перевагами цих машин у порівнянні з ДРУ та ТМ ПТ вважаються:

- Простота конструкції: АТМ простіше в виготовлення, оскільки відсутня щітково-колекторний вузол, технологічно складний для виробництва. Проте АТМ дорожче колекторних можна порівняти за вартістю реалізації, тому для виробника рухомого складу дана перевага не є суттєвою;
- Зменшення витрат на експлуатацію, оскільки не вимагає періодичної заміни вугільних щіток, механічною обробки (шліфування, продорожка).

Відповідно, менші витрати потрібні на оснащення моторної ділянки експлуатуючого підприємства у разі, якщо весь інвентар оснащений АТМ (не потрібні верстати для проїзду колектора, скорочено кількість токарних верстатів). При цьому залишається необхідність обслуговування підшипникових вузлів: своєчасної заміни мастила та заміни підшипників;

- Зниження витрати енергії за рахунок відсутності реостатного пуску і більше ефективного використання рекуперативного гальмування (проте значно існує втрат у перетворювачах). Витрата енергії на тягу при використанні різних ТЕП розглянуто докладніше в окремому розділі;
- АТМ розрахований на більше високу частоту обертання і може мати більше високою потужністю на одиницю обсягу, ніж КТМ (для ЕРС з швидкістю понад 180 км/год). Однак, для передачі вищої частоти обертання на колеса потрібно більш масивний 2-ступінчастий редуктор з великим передатним ставленням.
- Зменшення кількості контактної (комутаційної) апаратури при відсутності перемикання у схемі з'єднання двигунів, т.к. у цьому немає потреби через відсутність реостатного пуску;
- Поліпшення умов роботи силового комутаційного обладнання, оскільки перемикання силових контакторів виконуються без струму. Ця перевага дозволяє зменшити кількість ремонтних впливів на вагон при проходженні планового обслуговування, оскільки відпадає потреба у зачистці контактних пар контакторів. Відповідно, зменшується час технічного

обслуговування, що дозволяє заощаджувати трудові ресурси (скорочення кількості низькокваліфікованого обслуговуючого персоналу);

- Підвищення тягових властивостей за рахунок більше жорстких динамічних характеристик АТМ по відношенню до КТМ з послідовним збудженням;
- Можна реалізувати більш високе пускове прискорення, ніж у приводу ДРУ у зв'язку з відсутністю коливань сили тяги при пуску, що впливає на комфорт пасажирів і знижує витрату енергії;
- Можливість отримання найбільш сприятливої тягової характеристики, залежно від заданих умов руху за допомогою комбінацій частоти живлення ТМ і величини напруги живлення (робота в області максимального К.П.Д. тягового двигуна, з максимальною реалізацією зчеплення і т.п.);
- Можливість реалізації автоматичної протибоксувальної системи. У випадку втрати зчеплення колеса з рейкою, починається процес боксування, при цьому мікропроцесорний блок отримує з датчика частоти обертання, встановленого на відповідному тяговому двигуні, інформацію про частоту обертання колісної пари і, порівнюючи її з даними з датчиків інших тягових двигунів, робить висновок про боксування та дає команду на зменшення тягового зусилля на живильному даний двигун перетворювачі до тих пір, поки частота обертання валу двигуна не відновиться, що відповідає припиненню боксування;
- АТМ більше стійкі до попаданню вологи і наступному зниження електричної міцності ізоляції, ніж колекторні. Ця перевага досить суттєва для трамвая, оскільки тягові двигуни підвішені низько і схильні до впливу вологи під час атмосферних опадів, а просушування двигуна є трудомісткою операцією і зазвичай вимагає його демонтажу. Також волога може проникнути в тягові двигуни під час мийних робіт. Однак, ця перевага незначна для метрополітену.

Недоліки систем ТЕП з АТМ

- Складний пристрій тягового перетворювача в порівнянні з реостатно-контактної системи управління. У зв'язку із цим необхідність додаткових капіталовкладень на перепідготовку персоналу (збільшення розміру заробітної плати) та обладнання спеціальних діагностичних стендів для перевірки працездатності електронного обладнання (вони виготовляються під конкретною модифікацією тягового перетворювача);
- ЕРС із передачею змінного струму, зазвичай, важче, ніж ЕРС із передачею постійного струму. Найменша маса ТМ не компенсує додаткової маси інверторів;
- висока вартість тягового перетворювача, що перевищує кілька разів вартість тягового двигуна. Основний внесок у вартість перетворювача роблять силові ключі (транзистори IGBT) зарубіжного виробництва, вартість яких сягає 100 тис. крб. за штуку (табл. П4.) за рахунок застосування дорогого перетворювача рухомий склад виходить в цілому дорожче, ніж аналогічний з реостатно-контакторної системи управління. Також висока вартість тягових перетворювачів ускладнює їх придбання для забезпечення оборотного фонду, необхідного для оперативної заміни агрегату, що вибув по несправності ;
- необхідність застосування шихтованого статора і ротора, що ускладнює виробництво двигуна та веде до його подорожчання. Ротор і статор виготовляють шихтованими для запобігання виникненню вихрових струмів, що замикаються в магнітопроводах статора і ротора і ведуть до збільшення втрат потужності;
- високі вимоги до точності виготовлення і ремонту деталей ТМ, підшипників для дотримання рівномірного повітряного зазору між статором і ротором (близько 1 мм для більшості ТМ) та недопущення їхнього дотику;
- необхідність регулярною очищення електронних плат перетворювача від пилу за допомогою продування, оскільки струмопровідний пил може викликати замикання між струмоведущими доріжками плат, пробої напівпровідникових елементів, призвести до помилкових спрацьовувань та псування електроустаткування;

- необхідність системи охолодження тягового перетворювача. У зв'язку зі суворо обмеженою температурою кристала транзистора виникає потреба в ефективному відведенні від нього тепла. Перетворювач зібраний в закритому корпусі, і природне охолодження не дозволяє відвести потоки потужності, що виділяються. Тому застосовують обдування силових транзисторів вентиляторами. Вони стають додатковими ускладненням системи тягового приводу і вимагають особливого уваги при проведенні технічного обслуговування, оскільки є відповідальним вузлом, при несправності якого електроніка, що управляє, не дасть команду на запуск перетворювача;
- можливий розкид навантажень по ТМ в випадку групового харчування кількох ТМ від одного перетворювача. Оскільки електромеханічні характеристики кожної ТМ дещо відрізняються один від одного, а також можуть незначно відрізнятися діаметри коліс у різних колісних пар, то у разі живлення однаковою напругою з певною частотою та амплітудою різні ТМ можуть працювати в різних точках характеристики, а також на різних характеристиках, що викликає нерівномірність розподілу тягових струмів між ТМ. Тобто одна ТМ може виявитися перевантаженою, а іншою недовантаженою. Це особливо виражено при жорстких тягових характеристиках. Для вирішення цієї проблеми використовують індивідуальне харчування ТМ, але це збільшує вартість рухомого складу. Для справедливості варто відзначити, що аналогічна проблема зустрічається і на рухомому складі з ДРУ, але там вона посилена тим, що ТМ вагона одержують живлення від одного джерела;
- невисока надійність датчиків частоти обертання, розташованих на валах ТМ та їх роз'ємів. Дані датчики схильні до динамічних і коливальних навантажень (при порушенні динамічного балансу складання хвостовик редуктора - карданний вал – муфта ТМ), а також впливу вологи та частинок пилу та бруду, внаслідок чого вони виходять з ладу. При непрацюючому датчику частоти обертання неможливе функціонування системи ТЕП, тому багато виробників резервують їх, встановлюючи по 2 датчики на один вал ТМ;

- необхідність застосування ємнісного фільтра (з значними масо-габаритними параметрами) для фільтрації напруги контактної мережі.
- АТМ порівняно з ТМ ПТ при рівних потужності та частоті обертання мають менший ККД. Це обумовлено поряд їх особливостей, в зокрема низькимькоефіцієнтом потужності. При потужності приводу до 300 кВт, ТМ ПТ ефективніше за АТМ, оскільки має більш високі значення ККД [8].
- недоліком АТМ як електромеханічного об'єкта є передача потужність, необхідна для створення магнітного потоку. За рахунок намагнічуючого струму збільшується струм статорної обмотки, підвищуючи її теплове навантаження. В результаті знижується ККД та коефіцієнт потужності.
- економія на експлуатаційних витратах ЕРС з АТМ недостатня для окупності їх більшою початкової вартості.
- втрати на ключові елементи. Оскільки в режимі тяги тяговий перетворювач постійно знаходиться в роботі, то і втрати будуть відбуватися в ньому весь час, за який вагон розганяється.

Порівняльний аналіз систем ТЕП вагонів метрополітену постійного струму з тиристорно-імпульсним управлінням і дискретним реостатним управлінням

Схема силових ланцюгів вагона метро з тиристорно-імпульсним управлінням (ТІУ) представлена на рис 2.1.

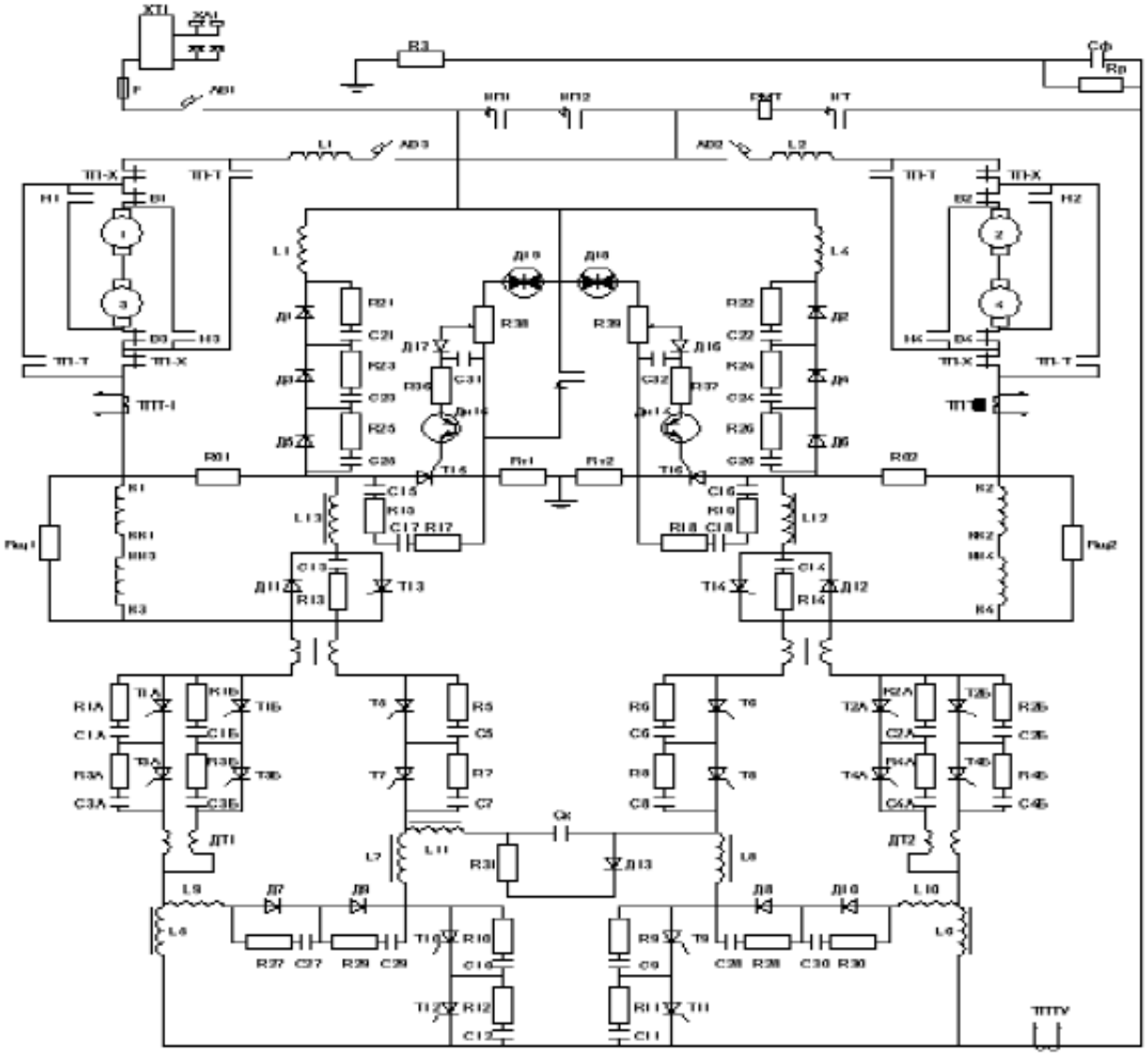


Рисунок 2.1 - Схема силових ланцюгів вагона метро з ТІУ

Розглянемо спочатку принцип дії тиристорно імпульсного без реостатного пуску. Пристрій, за допомогою якого здійснюється імпульсне регулювання напруги, зазвичай називають тиристорно-імпульсним

регулятором (ТІР). Воно складається з тиристорно-імпульсного переривника (перетворювача) (ТІП), вхідного $L_ф$, $C_ф$ і вихідного $L_д$, $Д_о$ фільтрів (рис. 2.2).

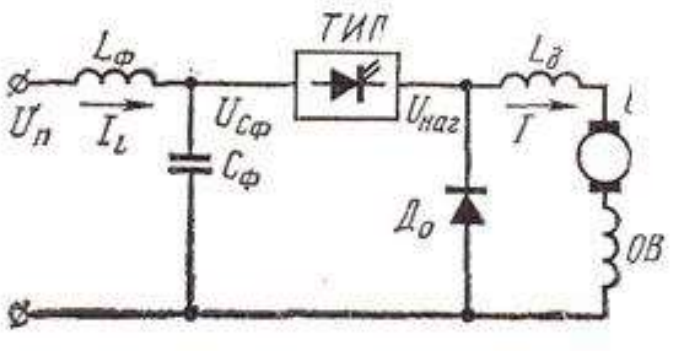


Рисунок 2.2 – Схема тиристорно-імпульсного перетворювача (ТІП), вхідного $L_ф$, $C_ф$ і вихідного $L_д$, $Д_о$ фільтрів

За допомогою ТІП безперервна напруга контактної мережі і перетворюється на послідовні імпульси. Вхідний фільтр зазвичай Г-подібного типу, складається з індуктивності $L_ф$ і ємності $C_ф$ і служить для обмеження перенапруги на ТІП при його замиканні, а також для згладжування пульсацій струму в контактної мережі.

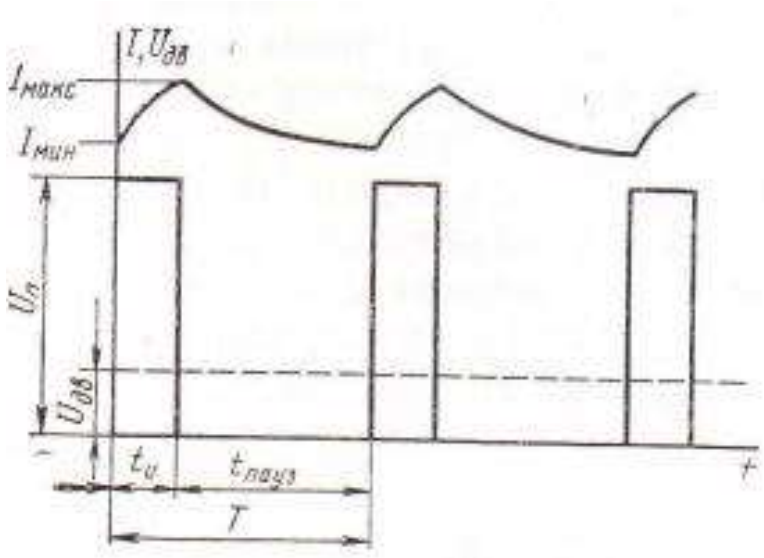


Рисунок 2.3 – Діаграма напруг, що змінюється переодичним відмиканням та замиканням ТІП

За відсутності $C_ф$ і наявної індуктивності в контактній мережі було б неможливо переривання струму з допомогою тиристорів, оскільки ця індуктивність затримувала б спадання струму та викликала б не допустимі перенапруги на затискачах ТІП. Вихідний фільтр складається з додаткової індуктивності (дроселя) $L_д$ і зворотного вентиля (діодів) Д про які замикається струм двигуна після замикання ТІП.

Напруга на двигунах змінюється переодичним відмиканням та замиканням ТІП (рис. 2.3). Середня напруга на двигунах, якщо знехтувати відносно малим падінням напруги на дроселі $L_д$ дорівнює середньому напрузі на навантаженні за період регулювання

де t - ширина імпульсу ; λ - коефіцієнт заповнення:

(f=1/T - частота регулювання)

Струм, що споживається від джерела живлення I_L можна визначити з рівняння балансу електроенергії, що поводиться і використовується

Легко показати, що при заданому значенні струму регулювання ланцюга двигуна між швидкістю ЕРС v і λ має місце прямолінійна залежність, тобто для отримання I=const потрібно збільшувати пропорційно підвищенню швидкості ЕРС. Наступним чином,

де λ_{v0} - коефіцієнт заповнення при v=0.

За способом зміни коефіцієнта заповнення системи імпульсного регулювання поділяються на частотно-імпульсні (t= const), широтно-імпульсні (

f Електромагнітні процеси в ланцюгу двигуна при пуску (див. рис. 3) описуються такими рівняннями:

= при відкритому ТІ:

c

o

r при замкненим ТІП:

s

t

)

де $L = L_я + L_д$ - індуктивність ланцюга двигуна; $r = r_я + r_д$ - активне опротивлення ланцюг двигуна.

При вирішенні нелінійної системи диференціальних рівнянь (2.1)-(2.7) нижче докладно розглянуто принцип роботи системи силових ланцюгів ЕРС з ТІУ та побудовано графіки.

м Переваги ТЕП з ТІУ

б Основні прогнозовані переваги системи постійного струму з ТІУ в порівнянні з існуючою системою постійного струму з ДРУ:

нідвищення надійності електроустаткування завдяки усуненню контактної комутаційної апаратури;

безреостатний плавний пуск, що дозволяє поряд з усуненням втрат у пускових опорах підвищити пускове прискорення;

нлавне регулювання швидкості во всім діапазоні її зміни;

іплавне рекуперативне гальмування в широкому діапазоні швидкостей без спеціальних збудників або обмоток паралельного збудження ТМ;

(

м

$$U_{Сф} - E = L(\frac{di}{dt}) + r_i$$

i

усунення перемикань ТМ для регулювання швидкості;
можливість застосування постійної паралельної сполуки ТМ, що покращує використання зчіпної ваги;
можливість підвищення на 10-20% середньої напруги, що підводиться до двигунів, і відповідне підвищення їх потужності, а отже, і швидкості руху;
захист ТМ від впливу вагань напруги і перенапруг в тягової мережі (малося на увазі постійне включення імпульсного перетворювача);
простота автоматизації операцій по управлінню ЕРС [13].

Виняткова важливою, що прогнозувалися перевагою ЕРС постійного струму зі статичними перетворювачами є можливість підвищення напруги в КС. Підвищення напруги значно знижує вартість системи електропостачання, а також втрати електроенергії, на лініях, що знову електрифікуються, зменшує необхідну кількість тягових підстанцій і загальну витрату кольорових металів на обладнання ЕРС [10].

Ступінь економічної ефективності тиристорного управління ЕРС визначається співвідношенням між збільшенням вартості ЕРС та зменшенням експлуатаційних витрат, обумовленим підвищенням швидкості та зменшенням витрати електроенергії внаслідок усунення втрат пускових опорах та скорочення гальмівних втрат. Крім того, завдяки збільшенню надійності електроустаткування ЕРС повинні знизитися витрати на його ремонт [53]. Якщо застосовувати більш високу напругу в контактній мережі, то різко скоротиться також вартість спорудження та експлуатації системи електропостачання. На існуючих ділянках, електрифікованих на постійному струмі, підвищення напруги в тяговій мережі призводить до збільшення пропускної спроможності за умов електропостачання і тим дозволяє відмовитися від інших, більш дорогих способів збільшення пропускної здатності, як, наприклад, спорудження проміжних тягових підстанцій [5].

Порівняльна оцінка ефективності систем ТЕП з ДРУ та ТІУ

Принципи роботи системи силових ланцюгів ЕРС з ДРУ і ТІУ.

Практично на всьому експлуатованому ЕРС постійного струму сьогодні використовується реостатний пуск із ступінчастим регулюванням опору пускового резистора (рис. 2.4).

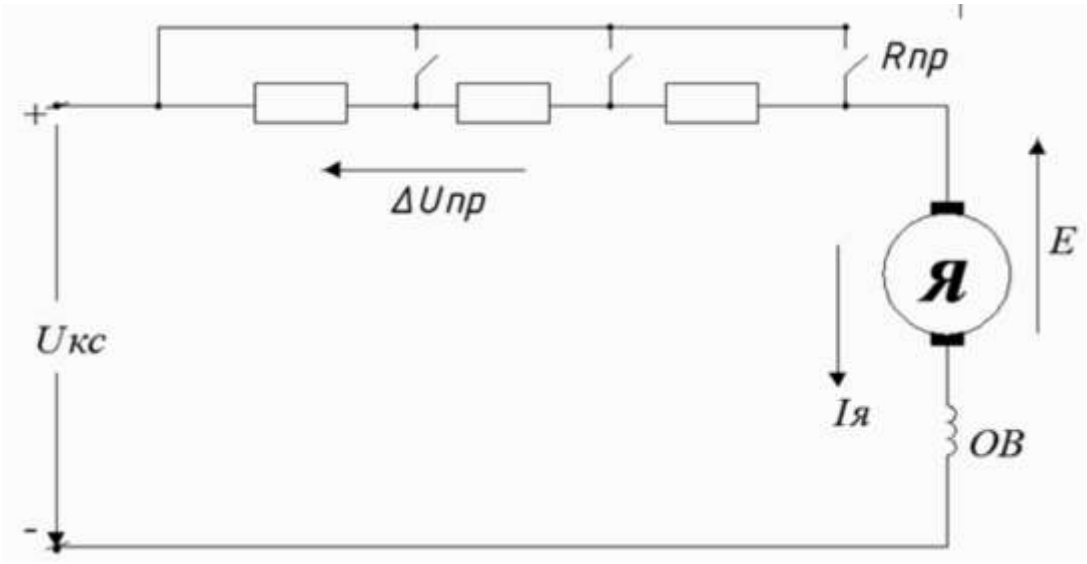


Рисунок 2.5 – Ступінчасте регулювання опору $R_{пр}$

У процесі збільшення при розгоні поїзда прикладеного до ТМ напруги зменшується від максимуму до нуля. Наприкінці цього процесу при одноступінчастому пуску (без перегрупування ТМ) втрати в пусковому резистори перевищують корисно використану енергію.

Для зменшення шкоди від реостатних втрат більшості типів ЕРС у процесі пуску роблять перегрупування ТМ. Завдяки цьому втрати знижуються в 2 рази і більше, але все ж таки вони залишаються суттєвими і можуть становити помітну частину загальної витрати енергії на тягу поїздів. Ця обставина зумовила прагнення покращити енергетичні показники ЕРС насамперед саме за рахунок виключення реостатних втрат.

Найбільш простим способом усунення реостатних втрат є використання імпульсного керування, практична реалізація якого стала можливою після

створення керованих напівпровідникових вентилів. Для цього (Рис. 2.6) до шунтованої діодом До ланцюги з послідовно включених якоря $Я_i$ обмотки збудження ВВ тягової машини потрібно короткочасно за допомогою комутатора підключати напругу контактної мережі $U_{кс}$.

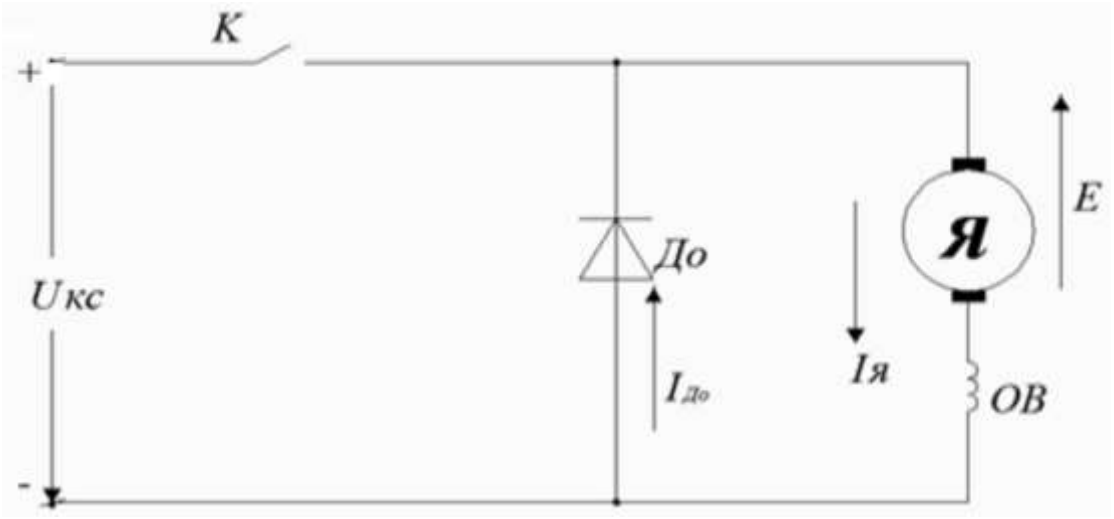


Рисунок 2.6 – Принципова схема приводу з імпульсним перетворювачем в режимі тяги

При цьому (Рис. 2.7) в перебіг частини періоду часу Т від 0 до t_1 коли К замкнутий, $I_я = I_{кс}$ росте, а в решті періоду $I_я = I_{Д0}$ падає.

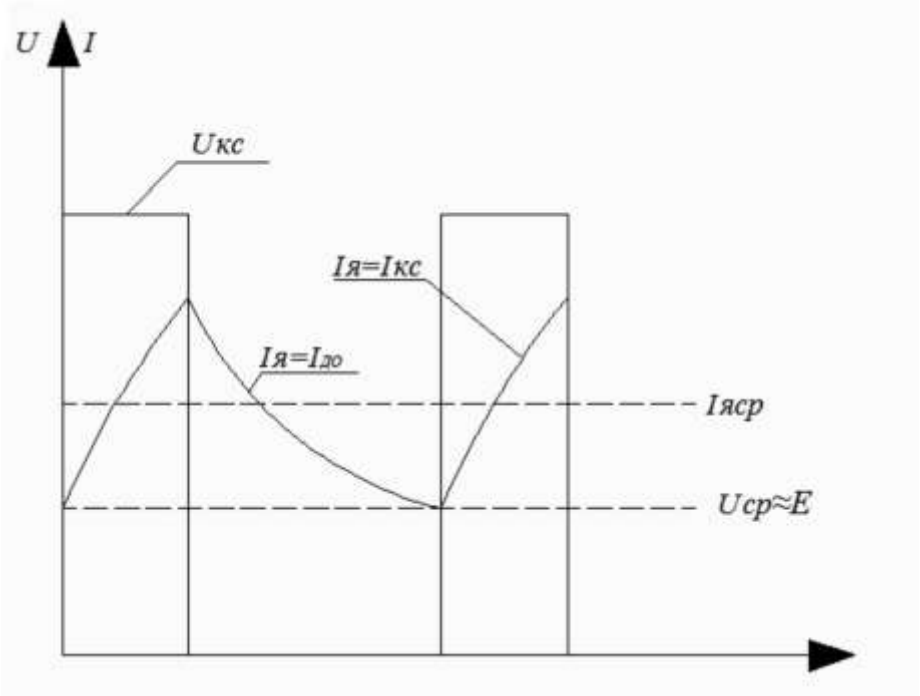


Рисунок 2.7 – Осцилограми при імпульсному регулюванні

Очевидно, що таке управління можливо тільки за високою частоті роботи комутатора К, тобто за малому часі Т. Практично комутатор К може бути виконаний лише з урахуванням напівпровідникових приладів – тиристорів чи транзисторів. У такій схемі середнє значення струму якоря $I_{я.ср}$ регулюється шляхом зміни середнього значення напруги $U_{ср}$ за рахунок зміни так званого коефіцієнта заповнення $\lambda=t_1/T$. У такий спосіб виключаються реостатні втрати і досягається плавне регулювання $I_я$. Однак практичне використання імпульсного управління в подібному, найпростішому виконанні неможливе.

По-перше, пульсації струму в ланцюгу ТМ різко погіршують умови їх роботи: зростають втрати та нагрівання, погіршується комутація. Зокрема, на початку робіт зі створення системи ТІУ для метровагонів, було встановлено, що при частоті роботи перетворювача менше 150 Гц двигуни метровагонів типів ДК-104Г і ДК-108А-1 не можуть працювати без додаткової індуктивності, що згладжує, так як інакше протягом 2 – 3 хв вони нагріваються до 100 – 150 град., які комутація вкрай незадовільна. Тому при ТІУ в ланцюг ТМ обов'язково має бути включена індуктивність $L_ф$ і, крім того, для зниження пульсацій потоку збудження його обмотка ОВ повинна бути шунтована резистором $R_ш$ (рис. 2.8).

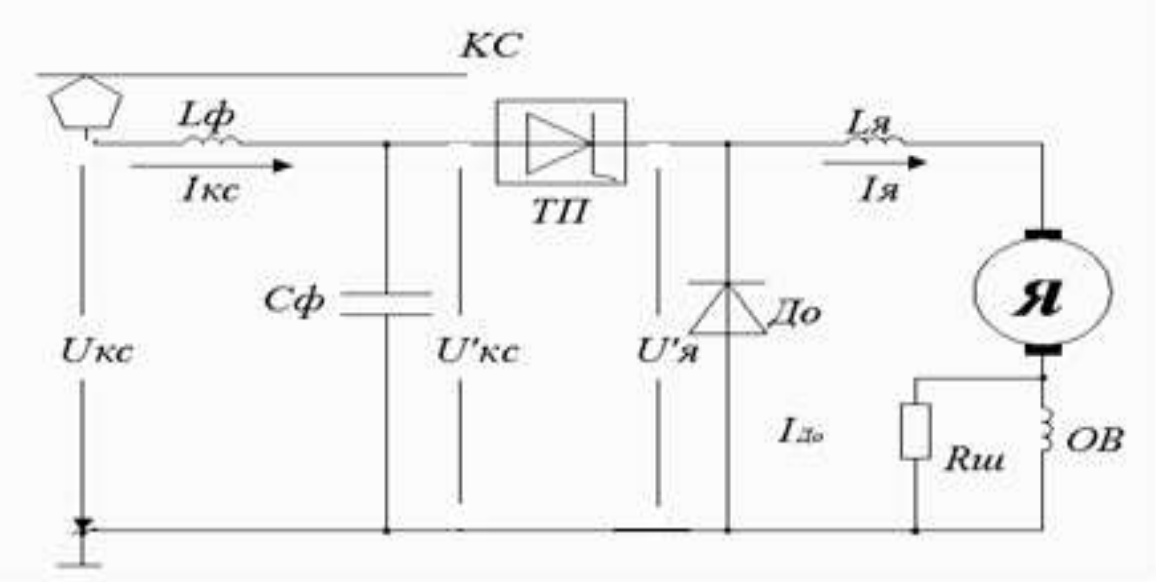


Рисунок 2.8 – Силова схема з ТІУ, що включає індуктивність $L_я$ і резистор $R_ш$

По-друге, на залізничному транспорті через негативний вплив на кодові сигнали, що передаються по рейкових ланцюгах, що забезпечують безпеку руху поїздів, неприпустимі скільки-небудь значні пульсації струму в контактній мережі. Тому напруга до тиристорного переривника-перетворювача (ТП) повинна підводитися через ефективний фільтр. Сьогодні практично завжди використовується Г-подібний LC-фільтр.

Отже, схема рис. 2.6 повинна бути доповнена двома фільтрами та перетворюється на схему рис. 2.8. Завдяки включенню фільтрів пульсації $I_я$ різко знижуються, а пульсації $I_{кс}$ практично виключаються, так як при струмі вимірюваному сотнями або тисячами ампер, пульсації $I_{кс}$ обмежуються десятками або сотнями mA, в результаті знижуються додаткові втрати енергії в тягових машинах і зменшуються до допустимого рівня струми, що заважають, в рейкових цілях. Проте все це досягається за рахунок використання електричного устаткування, у якому, природно, також виникають втрати енергії. Показники ТІУ як тяги характеризуються представленими на рис. 2.9 та 2.10 діаграмами зміни миттєвих та середніх значень струмів та напруг.

Протягом першої частини періоду λ.Т (див. рис. 2.9) відкритий ТП і до ланцюга послідовно включених $L_я$ тягових машин підведено напругу $U'_я = U'_{кс}$ (напруги на ємності фільтра $C_ф$). При цьому $I_я$ зростає, а $U'_я$ падає через розряд $З_ф$. У другій частині періоду (1-λ).Т, тоді ТП закритий, $I_я$ замикається через $Д_0$ і падає, а $U'_{кс}$ росте завдяки підзаряду $З_ф$ від контактної мережі КС через індуктивність фільтра

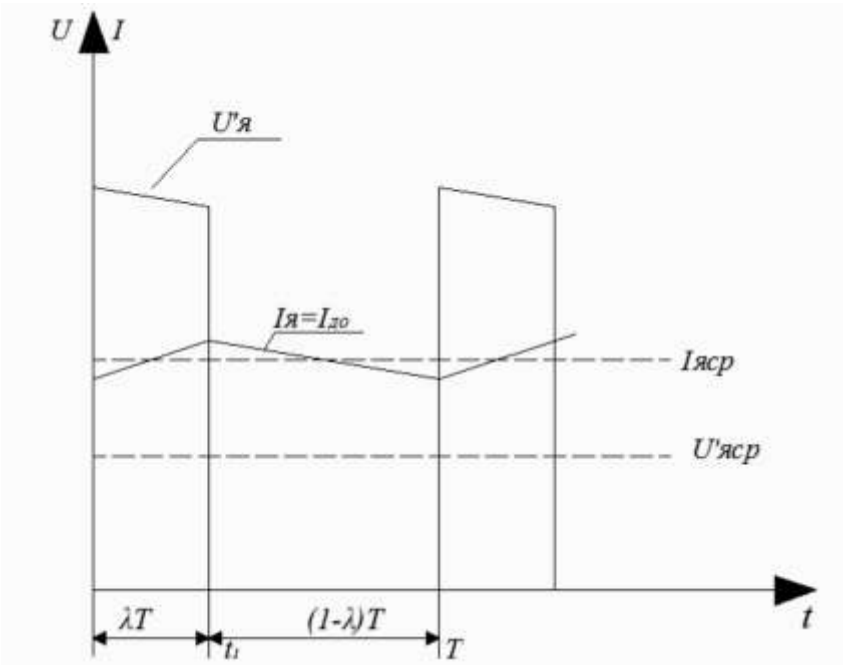


Рисунок 2.9 – Діаграма зміни миттєвих та середніх значень струму та напруги

У результаті в процесі пуску (з обліком відзначених вище припущень) по мірі зростання λ від 0 до 1 середнє значення струму $I_{я.}$ підтримується на заданому рівні (див. рис. 2.10) а середнє значення прикладеного до ТМ напруги лінійно розрахунок від 0 до 1, тобто до $U'_{кс}$. Аналогічно для споживаного з контактної мережі струму $I_{кс}$. Отже, $U'_{яср} = λ.U'_{кс}$; $I_{кс} = λ.I_я$ і $I_{кс} .U_{кс} = U_{яср} .I_{яср}$, т. е. пуск відбувається нібито без втрат енергії у пристроях регулювання напруги. У цьому полягає одна з головних переваг ТІУ.

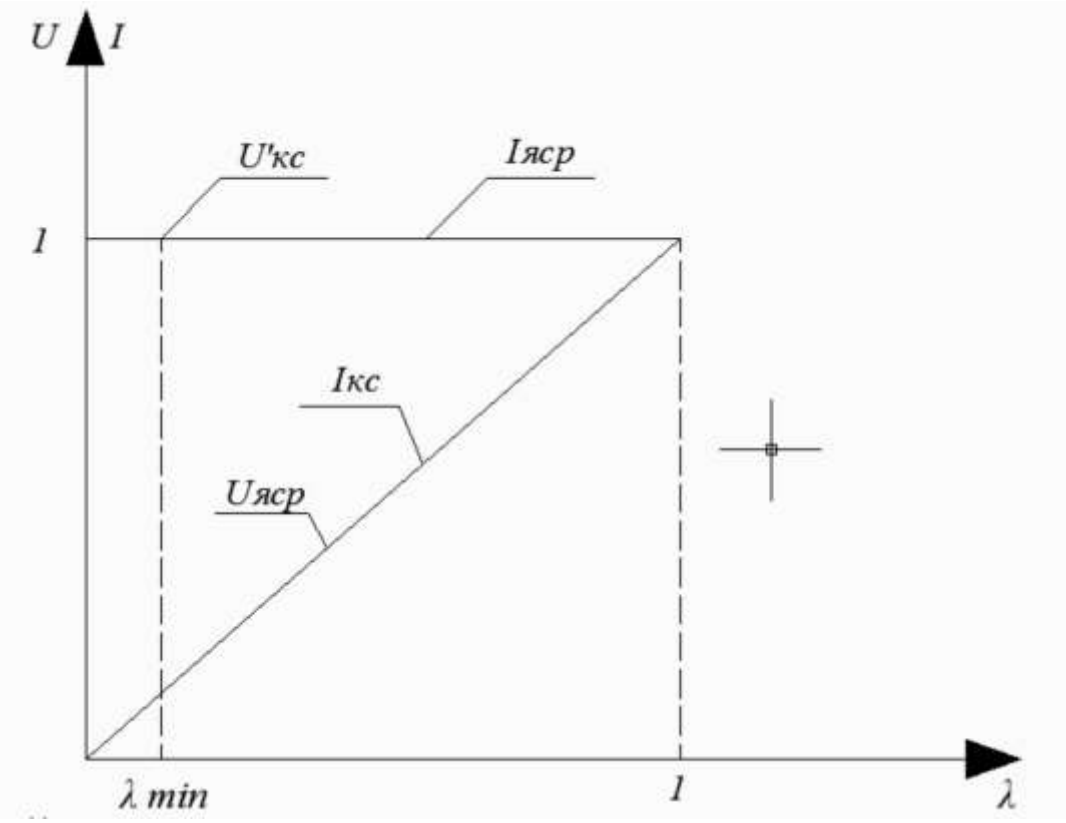


Рисунок 2.10 – Діаграма зміни струму і напруги

Контактна апаратура і показники електрообладнання

При використанні тиристорно-реостатного контролера (ТРК) регулювання опору пуско-гальмівних резисторів здійснюється, як завжди, - виключенням їх сходів, але шляхом включення чергового тиристора, що замінює контактор. Таке технічне рішення має низку очевидних переваг. Найважливіше їх – різке підвищення швидкодії та можливість збільшення числа ступенів регулювання опору пуско-гальмівних резисторів, тобто. зменшення коливань сили тяги та гальмування. Крім того, спрощується вирішення задачі та підвищується точність забезпечення заданої залежності прискорення поїзда від часу у початковій стадії пуску, що необхідно, зокрема, на ВМ.

Природним запереченням проти ТРК є необхідність застосування, як і за ТІУ, великої кількості тиристорів з відповідними пристроями управління. У той же час у ТРК можна використовувати тиристори низького класу з великим

часом відновлення замикаючих властивостей та з гранично простими пристроями управління і зашиті від небезпечних режимів. Тим не менше і в цьому

У випадку, як показали попередні оцінки, ТРК дорожчий за КРК, хоча його застосування окупається в короткий термін за рахунок зниження витрат на експлуатацію.

Таким чином, при ТІУ контактні апарати не тільки не усуваються, як це передбачалося спочатку, але їх кількість зменшується не настільки кардинально і принаймні не так порядок, як це ще стверджували деякі спеціалісти. Тим не менше кількість контактної апаратури в схемах з ДРУ трохи більше, чим при ТІУ. Однак це обставина не може бездоказово розглядатися як істотний недолік ДРУ, а може навіть віднесено до його переваг. Справа в тому, що за рахунок збільшення кількості контакторних однотипних апаратів, які необхідні і при ТІУ, наважуються ті ж завдання, які при ТІУ вимагають використання складних, дорогих та енергоємних тиристорних перетворювачів. При заміні ж приводу з ДРУ на ТІУ залишається необхідність проводити та організувати експлуатацію всіх типів контакторних апаратів, за винятком реостатного контролера (хоча й останнє безумовно). Отже, за впровадження ТІУ необхідна організація виробництва і експлуатації всього складного і дорогого комплексу елементів, що комплектують систему ТІУ, при збереженні виробництва та експлуатації практично всією номенклатури апаратів. При меншому кількості останніх, звісно, зростуть питомі витрати і на виробництво, і на експлуатацію кожного окремого апарату.

Наявність на ЕРС з ТІУ великої кількості контакторних апаратів та специфічного для ТІУ електрообладнання зумовлює зростання маси та вартості комплекту електрообладнання та, природно, впливає на його надійність. Однак, як показав досвід, знак зміни надійності далеко не очевидний, хоча на початку створення приводу з ТВ підвищення надійності вважалося безперечним і розглядалося як одна з переваг ТВ.

Щодо маси електрообладнання, то маса електрообладнання вагонів метрополітену типу I (без обліку ТМ) на 23% більше, чим у серійного вагона 81.717 з ДРУ, а у наступного по часу розробки вагона метро з ТІУ типу I м маса специфічного для ТІУ електроустаткування на 14% більше, ніж у вагона типу I. Фактичне збільшення маси і вартості електрообладнання вагонів з ТІУ повинно бути більше, так як на вагонах електропоїздів ЕР24 в ЕР3О передбачалося використовувати, а на вагонах метрополітену використано ті ж ТМ, що і при ДРУ. між тим, як показано вище, застосування ТІУ вимагає збільшення маси машин при збереженні однієї і тієї ж напруженості їхньої роботи. Таким чином, як закордонний досвід, як і в Україні дані показують, що заміна ДРУ на ТІУ наводить до подорожчання і збільшення маси електрообладнання і не підвищує його надійність.

Тягові і гальмівні характеристики

Серед передбачуваних переваг ТІУ була можливість плавного регулювання сил тяги до гальмування у всьому діапазоні зміни швидкості руху. Це має важливе значення для пасажирського ЕРС, особливо метрополітену. Однак через обмеження мінімуму напруги на виході тиристорного переривника (ТП) практична реалізація даної теоретичної переваги в режимі тяги виявилася неможливою.

У той же час у приводі з ДРУ при НВ ТМ плавне регулювання сили тяги від нуля до максимуму досягається природним шляхом – за рахунок збільшення в процесі запуску струму збудження від нуля до номіналу. Отже, і за цим показником ТВ поступається ДРУ з НВ ТМ.

Не має ТІУ реальних переваг і в плавності регулювання гальмівної сили, особливо на метрагонах. Тут для підвищення ефективності гальмівного процесу при високій швидкості руху в ланцюгу якір включають баластові резистори з метою збільшення потужності тягових машин за рахунок збільшення напруги на їх колекторів. При використання баластного резистора

виникає проблемі регулювання його опору. Звичайно, що збільшення опору ступеня баластного резистора, що вимикається, веде до зростання стрибка гальмівної сили. Тому бажано застосувати максимально дрібні щаблі. Однак це призводить до збільшення числа контакторів у схемі, що суперечить основній ідеї ТІУ – безконтактності управління. Тож і тут треба шукати компроміс. На вагонах І М віддано перевагу зменшенню контакторів у схемі, і тому баластний резистор вимикається повністю. Це призводить до суттєвих коливань гальмівної сили, а також зниження енергетичної ефективності рекуперації.

Імпульсна рекуперація має недоліки в зоні малих швидкостей руху, при зупинці поїзда. Про перерахування переваг ТІУ зазвичай вказується можливість рекуперативного гальмування практично до повної зупинки. Але це твердження не відповідає дійсності. Фактично на вагонах метрополітену струм рекуперації зменшується до нуля за швидкості руху близько 8-10 км/год «реостатного» гальмування з самозбудженням при відкритому ТП. Ця обставина створює добре відомі (за аналогічним явищем на серійних вагонах) труднощі з механічним гальмуванням.

У системі з ДРУ та НВ ТМ забезпечується велика плавність регулювання гальмівної сили. У зоні високих швидкостей вона досягається за рахунок використання як баластного пускового резистора з наявними пристроями ступінчастого регулювання їх опору, а в зоні низьких швидкостей за рахунок підтримки максимальної гальмівної сили до швидкості близько 2 км/год

Потім вона лінійно зменшується до нуля в режимі «реостатного-гальмування із замкненим коротко ланцюгом якорів машин при максимальному струмі збудження». Це практично знімає проблему механічного догальмовування. Крім того, при НВ ТМ є можливість знизити розкид навантажень паралельних груп ТМ за рахунок відповідної корекції струмів збудження. Це додатково покращує тягові та гальмівні характеристики системи з ДРУ та НВ ТМ.

Таким чином, ТІУ поступається приводу з ДРУ з НВ ТМ та у тягових та гальмівних властивостях.

Вплив на тягові властивості

При обґрунтуванні необхідності заміни ДРУ на ТІУ передбачалося, що останнє забезпечить суттєве покращення тягових властивостей за рахунок збільшення сили тяги у зоні обмежень за умов зчеплення завдяки виключенню її коливань, властивих системі ТЕП із ДРУ; підвищення сили тяги в зоні ослаблення поля завдяки заміні ступінчастого регулювання плавним.

Застосування невиключеного ТП виявилося неможливим через втрати енергії як у ньому самому, і у ТМ. Більше того, було визнано необхідним і практично реалізується закорочення ТП разом з $L_я$ після закінчення процесу регулювання напруги. Але і в цьому випадку в ланцюзі якорів залишається $L_ф$, і тому напруга на колекторах ТМ, а отже, і сила тяги при ТІУ менша, ніж при ДРУ

Не має реальних переваг за тяговими властивостями ТІУ і в зоні регулювання напруги на колекторах ТМ, в якій сила тяги обмежена умовами зчеплення.

Тягові властивості ЕРС з ТІУ в зоні обмеження сили тяги по зчепленню погіршуються дією ще двох факторів: вимушеним ослабленням поля через шунтування ОВ та великою величиною мінімальної напруги при роботі широтного ТП з номінальною тривалістю робочого циклу.

Крім цього, для обмеження пульсації потоку обмотки збудження ТМ при ТІУ постійно шунтовані резистором, що призводить до деякого зниження сили тяги при тому ж пусковому струмі. Цей недолік погіршується у разі поєднаного регулювання напруги та поля, що значно послаблює поле у зоні регулювання напруги на колекторах ТМ.

Споживання енергії на тягу поїздів

Споживання енергії з енергосистем на просування поїздів визначається різницею між її витратою у тязі та поверненням за наявності рекуперативного гальмування.

За минулий час і в Україні, і за кордоном створені системи приводу з ДРУ, що забезпечують ефективне безперервне рекуперативне гальмування до низьких швидкостей за рахунок використання перегрупування ТМ. Наприклад, у системі MEI на ВМ рекуперація закінчується за швидкості близько 15 км/год, тоді як на вагонах з ТІУ вона закінчується при швидкості руху не менше 8 км/год. Очевидно, що така мала різниця швидкостей мало впливає на порівняльну енергетичну ефективність рекуперації систем приводу, що зіставляються.

Кількісна відмінність енергетичних показників ТЕП з РУ та ТІУ, виконаних за схемами рис. 2.11 та 2.12 [6], характеризується кривими на рис. при рекуперації вагонами з ТІУ типів Їм та І та вагона з РУ та НВ ТМ.

Як випливає з цих рис. 2.13, повернення енергії в мережу вагоном з ДРУ у розрахунковому для метро режимі руху (швидкість сполучення 48 км/год, довжина перегону 1,7 км) орієнтовно в 1,6 рази більше, ніж за ТІУ зі схемою вагона І м , що має нерегульований баластовий резистор. При цьому з урахуванням втрат енергії в пристроях електропостачання система ДРУ (крива НВ на рис. 2.9) при корисному використанні енергії рекуперації забезпечує зменшення споживання енергії на рух поїздів на 8-9 % порівняно з ТІУ [58].

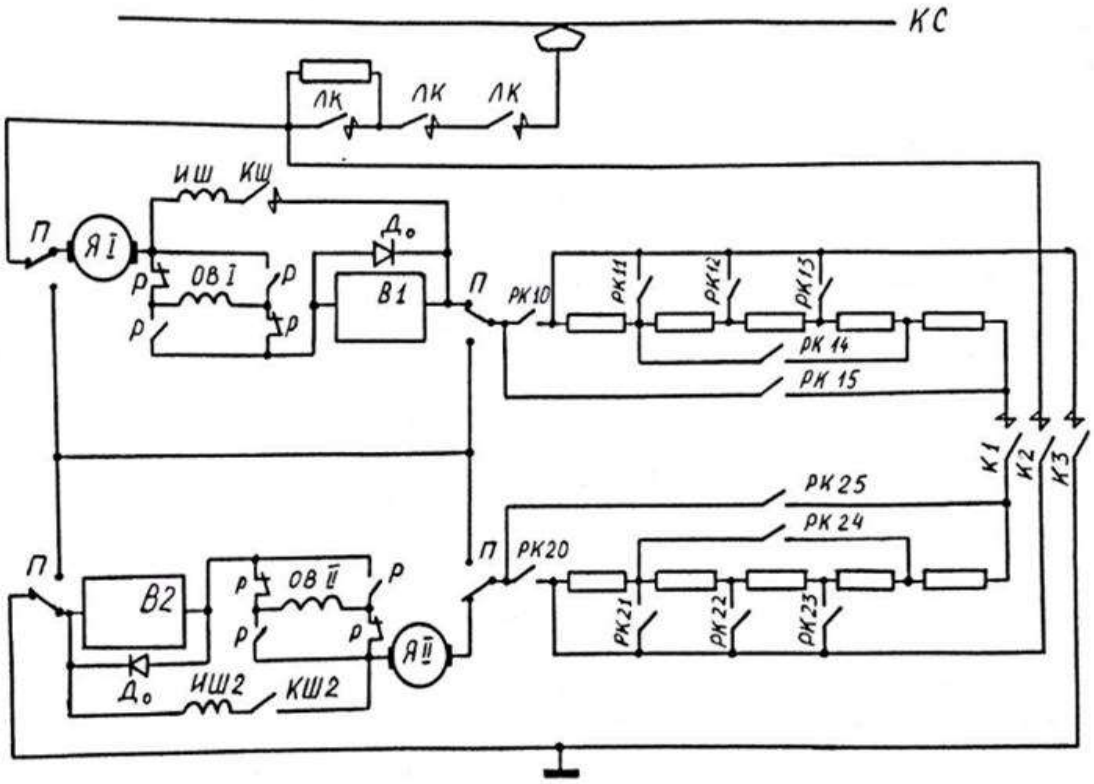


Рисунок 2.11 – Спрощена схема силових ланцюгів ТЕП з РУ і НВ ТМ

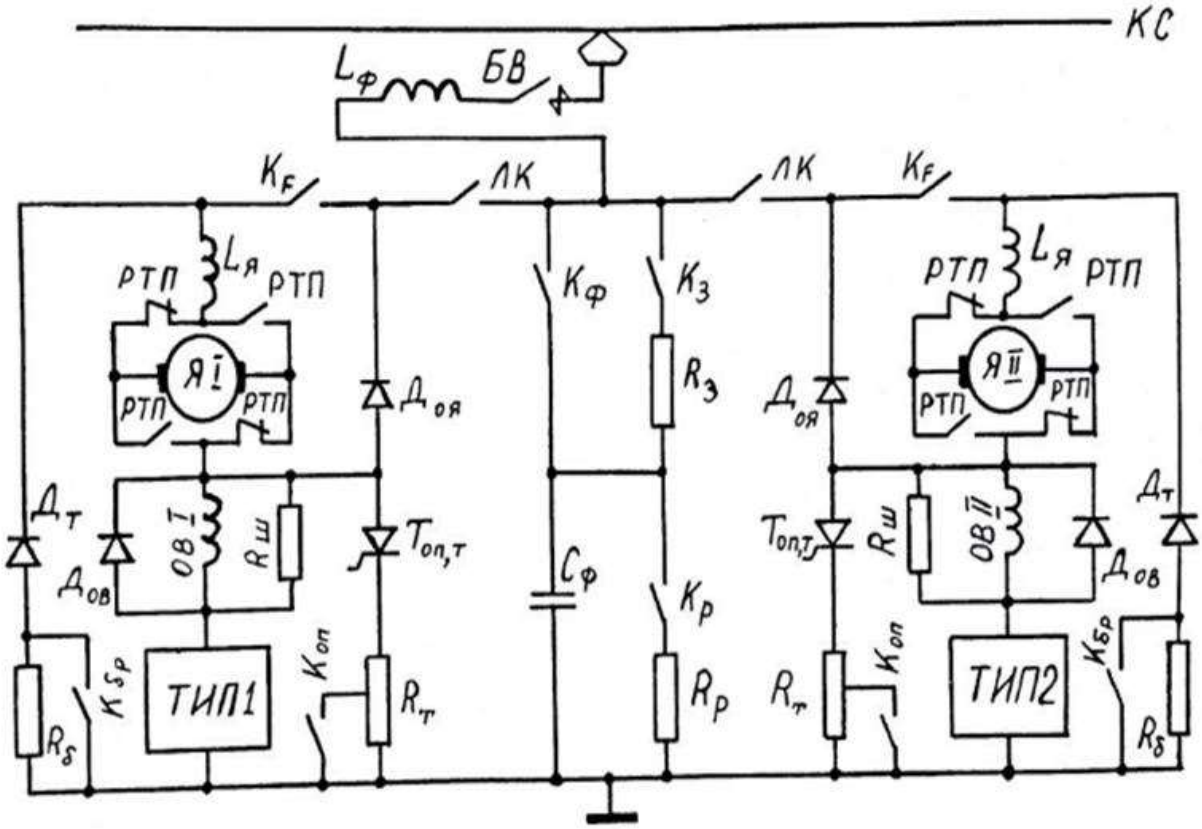


Рисунок 2.12 – Спрощена схема силових ланцюгів ТЕП з ТІУ

Таким чином, саме в тому показнику, за яким передбачалася найбільша перевага ТІУ, вона найбільше поступається сучасним системам ДРУ з НВ ТМ. Енергетичні показники рекуперації при ТІУ можуть бути покращені за рахунок регулювання опору баластного резистора та застосування у зоні роботи з ослабленням поля класичної рекуперації з НВ ТМ. Використовуючи обидва ці рішення, можна досягти ефективності рекуперації на ВМ з ТІУ, що дорівнює цьому показнику при ДРК з НВ ТМ. Але для цього необхідно електрообладнання вагона з ТІУ доповнити майже повним комплектом електрообладнання з ДРК, що явно недоцільно, та й нездійсненно по масогабаритним. показниками. Але навіть у цьому дуже проблематичному випадку буде досягнуто лише рівність енергетичної ефективності рекуперації при ТІУ та ДРК, але ніяк не перевага першого.

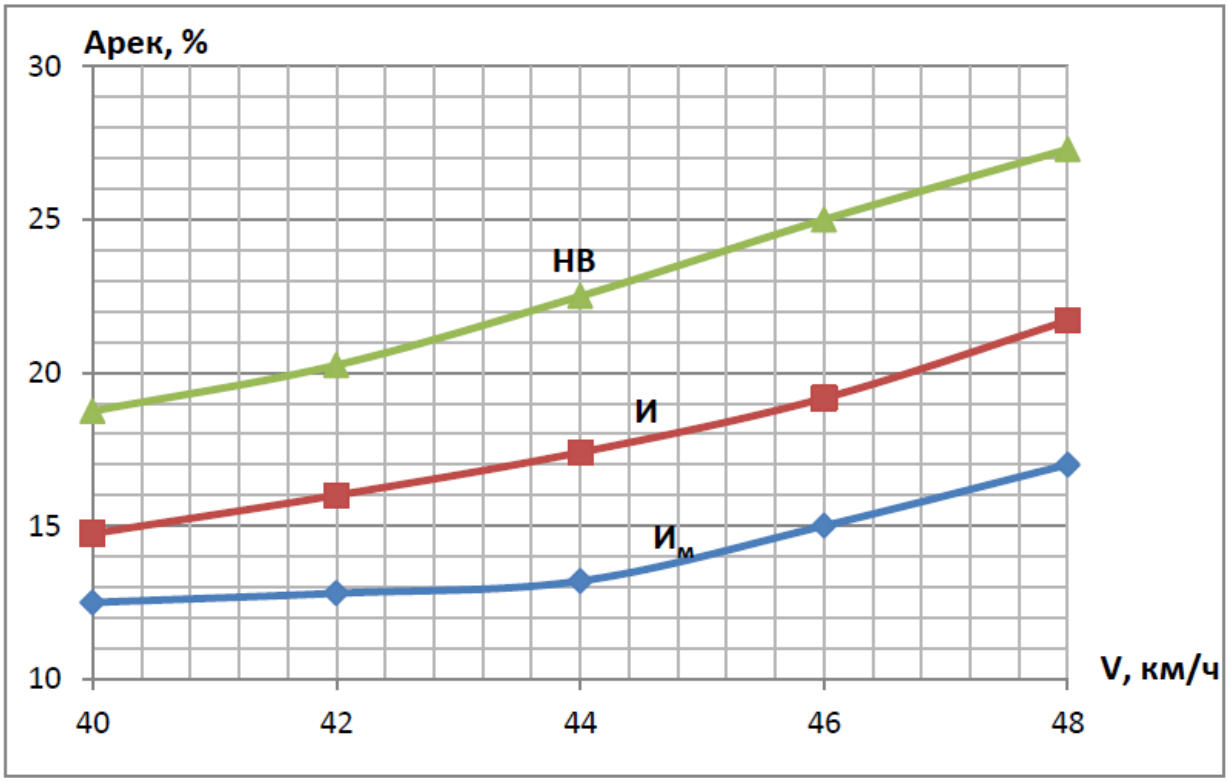


Рисунок 2.13 – Залежність від швидкості повідомлення повернення енергії при рекуперації А річок , виражені у відсотках від спожитої на тягу енергії

Отже, ТІУ з реальними параметрами суттєво поступається за енергетичною ефективністю рекуперації системі ДРУ з НВ ТМ. При цьому загальну енергетичну ефективність заміни ДРУ на ТВК можна забезпечити лише за рахунок скорочення втрат енергії в тязі. Ця мета на моторних вагонах в принципі може бути досягнута за рахунок покращення динамічних показників поїзда та виключення реостатних втрат. Але у зв'язку з погіршенням тягових та гальмівних характеристик динамічні показники вагонів з ТІУ також мають бути гіршими. Тому залишається єдиний резерв покращення енергетичних показників виключення реостатних втрат.

Таким чином, застосування на моторних вагонах ТІУ замість ДРУ з НВ ТМ і рекуперативним гальмуванням як дає економії енергії, а й веде до значного збільшення її споживання. Особливо це стосується випадку повного корисного використання енергії рекуперації, яке через його високу ефективність при серйозному ставленні до проблеми зниження витрати енергії на тягу поїздів має бути безумовно забезпечено.

2.6 Проблема ослаблення поля

У часи, коли система з ТІУ розроблялася, передбачалося відсутність існуючих втрат енергії в процесі регулювання напруги при ТІУ, що стало підставою для припущення можливості використання в цій системі ТМ з високолежачими характеристиками - аж до повної відмови від ослаблення поля. Однак при цьому розширюється діапазон роботи ТП з коефіцієнтом заповнення λ <1 і збільшуються втрати енергії як у самому ТП, так і ТМ. Тому і за ТІУ доцільно використовувати машини з низьколежачими характеристиками, що робить необхідним застосування. ослаблення поля. У зв'язку із цим необхідно доповнити пристроями ослаблення поля.

При ТІУ можна використовувати одну з трьох систем ослаблення поля:

1.Шунтуванням обмотки збудження резистором зі змінним опором;

2.Поєднане регулювання, при якому регулятор напруги забезпечує ослаблення поля;

3.Застосування для ослаблення поля додаткового спеціального тиристорного переривника.

Кожна з них має свої недоліки. При класичній системі зберігається контакторне регулювання, збільшується маса електроустаткування та не може використовуватися рекуперація. Поєднане регулювання дозволяє мінімізувати масу і вартість електрообладнання, але змушує використовувати ТП, що не виключається. Це призводить до зростання втрат, включаючи пульсаційні ТМ, а також погіршує тягові характеристики через ослаблення поля і в зоні регулювання напруги на колекторах цих машин. Застосування спеціального ТП для ослаблення поля також збільшує масу, вартість та складність електрообладнання (внаслідок наявності на ЕРС двох ТП).

Вплив на ефективність рекуперації

Однією з реальних переваг ТІУ перед ДРУ є можливість рекуперації за збереження послідовного порушення ТМ, тобто. без обладнання ЕРС спеціальним джерелом живлення обмоток збудження, необхідним для класичної рекуперації. Однак при цьому, як випливає з принципу роботи імпульсної рекуперації, напруга на колекторах ТМ повинна бути меншою за напругу в контактній мережі, що є істотним недоліком імпульсної рекуперації в порівнянні з класичною. Крім того, при імпульсній рекуперації практично виключається можливість обмеження аварійного зростання струму якорів ТМ при провалах напруги контактної мережі.

Якщо ж врахувати ще втрати у ТП і особливо внаслідок пульсаційних втрат у ТМ, висновок про необхідність відмовитися від імпульсної рекуперації в зоні високих швидкостей руху стане більш вагомим.

Оцінка техніко-енергетичної ефективності

Очевидно, що оцінка ефективності ТІУ, отримана в експлуатації одного типу ЕРС, може бути поширена на ТІУ загалом. Адже вона суттєво залежить саме від типу ЕРС та умов його експлуатації. Зокрема, енергетична

ефективність ТІУ багато в чому визначається величиною реостатних втрат та частотою пусків, вона не може бути однаковою, скажімо, на електровозі та трамваї. Це диктує необхідність вибору типу ЕРС, з урахуванням якого слід оцінювати показники ТІУ.

Видається очевидним, що з трьох типів залізничного ЕРС вагонів метрополітену, моторних вагонів наземних електропоїздів і електровозів найбільшу ефективність ТІУ можна отримати на вагонах метрополітену. Це пов'язано з великою частотою пусків та гальмувань при чіткому графіку та високій інтенсивності руху. Крім того, отримані для метрополітену результати легко використовувати для оцінки ефективності застосування ТІУ на моторних вагонах наземних електропоїздів. Тому оцінку ефективності ТІУ на основі реальних показників ТЕП, випробуваних хоча б у дослідній експлуатації, доцільно виконати насамперед метро.

Природно, що коректні та об'єктивні результати принципової оцінки ефективності вагонів метро з ТІУ та ДРУ могли бути отримані на підставі досвіду розробки та експлуатації вагонів з найбільш досконалими приводами обох систем. Однак практика не має такої можливості. Справа в тому, що в результаті технічної політики, що проводилася в життя протягом останньої чверті століття, наша промисловість практично не вела робіт з удосконалення приводу з ДРУ. Водночас, багаторазові спроби створення вагонів з ТІУ також не дали необхідних результатів. Сьогодні не тільки немає достатнього досвіду експлуатації, вагонів з ТІУ, але й немає остаточного рішення про перспективну систему ТІУ, оскільки на кожному новому вагоні застосовується принципово інша система. Так, на вагонах типу Е ір використано суміщене регулювання напруги на колекторах ТМ і струму в обмотках збудження, на вагонах типу І для регулювання напруги та струму збудження передбачені окремі ТП, а на вагонах типу І м для цих цілей застосовано частково поєднану структуру.

У подібній обстановці найбільш достовірні дані для порівняння систем з ТІУ та ДРУ можна отримати, спираючись на зарубіжний досвід та результати теоретичних і експериментальних досліджень. Остання обставина дозволяє

створювати ТЕП з найбільш досконалими системами ТІУ. Проте японці відмовилися від застосування на моторних вагонах ТІУ та зрештою результаті створили типову схему приводу з ДРУ і оригінальною системою НВ ТМ. Тому для порівняльною оцінки в якості базового зразка системи приводу з ДРУ доцільно використовувати японську типову схему, яка реалізована на всіх останніх електропоїздах, у публікаціях, що називаються енергозберігаючими. Важливо й те, що ця система приводу за основними показниками, такими як наявність перегрупувань ТМ в режимах тяги і рекуперативного гальмування, практично ідентична системі, розробленої в МЕІ. Як зазначалося, в Японії було розроблено та застосовано на електропоїздах та низку систем з ТІУ. Однак використовувати якусь із них як базову некоректно, оскільки японські фахівці дійшли висновку, що всі вони поступаються за ефективністю системі з ДРУ. Знаючи це, важко очікувати, що результат порівняння буде іншим. Хоча це й малоймовірно, але можна припустити, що японські фахівці не знайшли найефективнішого рішення для ТІУ і що тільки цим пояснюється віддана ними перевага системі ДРУ.

Система тягового електроприводу для вагонів метрополітену

Можливості покращення показників ТЕП вагонів метрополітену

У специфічних умовах роботи та будівництва метрополітенів одним з основних напрямків збільшення пропускної спроможності є покращення динамічних якостей рухомого складу: підвищення величин прискорень у процесі розгону та уповільнень при гальмуванні. Головним засобом досягнення цієї мети є збільшення потужності ТЕП, додатковим – зниження маси вагонів.

Тому одночасно з підвищенням динаміки ЕРС має вирішуватися проблема забезпечення більш економічної його роботи. Резервами покращення енергетичних показників поїздів метрополітену є зниження втрат у пускових резисторах, що становлять від 5 до 8%, підвищення К.П.Д. тягового приводу, втрати в якому перевищують 10%, та раціональне використання енергії гальмування, що становить до 45% загальних витрат енергії на рух поїзда. Ці цифри показують, що найбільший ефект у галузі покращення енергетичних показників поїздів метрополітену, в принципі, може дати застосування рекуперативного гальмування.

Однак практична реалізація цього резерву на метрополітені має свої особливості. Основне утруднення полягає у необхідності збереження гальмівних сил лише на рівні реалізованих при реостатному гальмуванні. Це завдання може бути вирішена декількома шляхами: подвійним збільшенням струмів по по відношенню до режиму реостатного гальмування, паралельним включенням ТМ на високих швидкостях руху та включенням до ланцюга якорів баластових резисторів. Кожне з цих рішень має свої очевидні недоліки. Практичне застосування поки що знаходить лише використання баластових резисторів. Іншою скрутою є використання поверненої в контактну мережу енергії. З урахуванням цього при рухомому складі з ТМ ПТ за рахунок рекуперації можна економити до 15 - 20% енергії. Необхідно також

враховувати вплив нових технічних рішень на масо-габаритні характеристики, вартість та надійність роботи електрообладнання вагонів.

Таким чином, проблема підвищення пропускної спроможності ліній метрополітену потребує вирішення непростих взаємопов'язаних завдань у галузі вдосконалення. ЕРС. Завдання додатково ускладнюється необхідністю обліку параметрів системи електропостачання та інших пристроїв, що забезпечують рух поїздів, зокрема автоблокування та автоведення.

В останні роки в Україні та за кордоном ведуться інтенсивні роботи в галузі покращення динамічних показників та інших експлуатаційних параметрів вагонів метрополітену. Основними напрямками цих робіт є: підвищення потужності ТМ ПТ у традиційній системі ТЕП з контакторно-реостатним управлінням; вдосконалення тиристорно-імпульсного управління за збереження ТМ ПТ послідовного збудження; обладнання вагонів з контакторно-реостатним та тиристорно-імпульсним регулюванням напруги на ТМ системою автоматично регульованого незалежного їх збудження; створення тягового приводу з безколекторними машинами змінного струму. Кожен із цих напрямків має свої переваги та недоліки.

Ефективність збільшення потужності ТМ підтверджена досвідом створення вагонів типу 81-717 із ТМ типу ДК-117 110 кВт. Порівняно з вагонами типу Е (потужність ТМ типу ДК-108 66 кВт) за тієї ж швидкості доставки пасажирів вагони типу 81-717 по даними, споживають енергії на 7% менше, незважаючи на те, що втрати в їх пускових реостатах на 4% більше (внаслідок зростання швидкості, при якій закінчується резисторне регулювання) [8].

Певним резервом зниження пускових втрат та деякого покращення динаміки за рахунок усунення коливань сили тяги є використання ТІУ. Однак при цьому виникають додаткові втрати у тиристорному. перетворювачі та його фільтрі, значно збільшується вартість і зростає вага електроустаткування (порівняно зі схемою контакторно-реостатного управління). Тому за відносно невеликих втрат у пускових реостатах ВМ застосування на них ТІУ економічно

виправдане лише за умови забезпечення ефективного використання рекуперативного гальмування, що може вимагати обладнання тягових підстанцій інверторами. Остання обставина може істотно вплинути на техніко-економічну ефективність впровадження ТІУ на ВМ.

Останнім часом широко досліджуються можливість та ефективність застосування на ВМ тягового приводу з безколекторними, в першу черга АТМ. Як основні аргументи на користь асинхронного приводу називають наявну можливість деякого зменшення витрати енергії за рахунок зниження маси ротора та скорочення витрат на експлуатацію ТМ. Усунення колекторно-щіткового апарату може суттєво спростити та здешевити експлуатацію, хоча в загальних витратах на обслуговування вагона частка ТМ становить не більше це перевага та можливе незначне зменшення маси ротора машини виходять за рахунок погіршення низки інших показників ТЕП.

Справа в тому, що в цьому випадку порівняно з тиристорно-імпульсним регулятором постійної напруги суттєво ускладнюється перетворювач, зростають його маса та вартість, значно зменшується ККД. Загальні втрати у приводі додатково збільшуються у зв'язку з нижчим ККД самих АТМ (порівняно з ТМ ПТ) і їх підвищеною чутливістю до пульсації і несиметрії струмів та напруг. При живленні всіх ТМ чи машин одного візка вагона від однієї перетворювача виникають труднощі з обмеженням розкиду їх навантажень. При харчуванні кожною машини від свого індивідуального перетворювача, яке дозволяє регулювати розподіл навантажень ТМ, додатково ускладнюються самі перетворювачі та їх системи управління, а також виникають труднощі із забезпеченням протибоксувального захисту.

Істотних труднощів потрібно подолати і для забезпечення процесів пуску та рекуперативно-реостатного гальмування вагонів з АТМ. Вітчизняний досвід створення ТЕП а з АТМ показав, що рішення технічних завдань, що виникають при цьому, вимагає значних зусиль.

Простіша система ТІУ набагато ближче до реального впровадження. Однак і вона після багатьох років досліджень на дослідних вагонах та поїздах все ще потребує доопрацювання, зокрема, підвищення експлуатаційної надійності. Безперечно, що технічні труднощі, що виникають під час створення працездатних систем ТЕП з імпульсним, згодом будуть подолані. Питання полягає лише у тривалості цього часу.

Не менш серйозною є проблема забезпечення економічної ефективності нових систем. Відомо, що і на вагонах наземних електропоїздів, і на ВМ із ТВ скорочення витрати енергії на тягу порівняно з контакторно-резисторним пуском поки не досягнуто.

Очевидно, що запровадження удосконалених систем ТЕП не можна починати до того, як вони покажуть вирішальні переваги перед освоєними. Ще більш вагомими техніко-економічними перевагами повинні володіти нові вагони, якщо ставити питання про заміну ними ЕРС, що ними не експлуатував, розрахункового ресурсу. Такий захід, вимагаючи великих матеріальних та трудових витрат, не може бути економічно ефективним при використанні всіх розглянутих напрямів удосконалення ТЕП, включаючи збільшення потужності ТМ, реалізоване на вагонах 81-717. Отже, в експлуатації ще довго будуть перебувати не виробили свій ресурс вагони старих типів.

Сьогодні назріла необхідність модернізації вагонів, що експлуатуються, яку, природно, слід здійснювати з максимальним використанням наявного електрообладнання. Найбільшою мірою цій вимогі задовольняє застосування на вагонах системи незалежного збудження тягових машин (НВ ТМ).

Особливість доцільності та ефективності запропонованої системи ТЕП для вагонів метрополітену

Для підвищення надійності електроустаткування експлуатованих вагонів, насамперед, слід знижувати відмови апаратів управління. Їх частка у відмовах становить понад 90%.

Реостатно-безконтактні контролери найкраще вирішують саме це завдання. Вони на порядок простіше за керуванням, алгоритмом роботи, схемно та конструктивно, ніж ІНСУ асинхронним двигуном і працюють у набагато менш напружених теплових режимах. Тому інтенсивність їх відмов буде, як мінімум, удвічі нижчою за ітенсивність відмов інверторів [12].

Принципова силова схема вагона метрополітену з НВ ТМ і ТРК представлена в рис. 3.1.

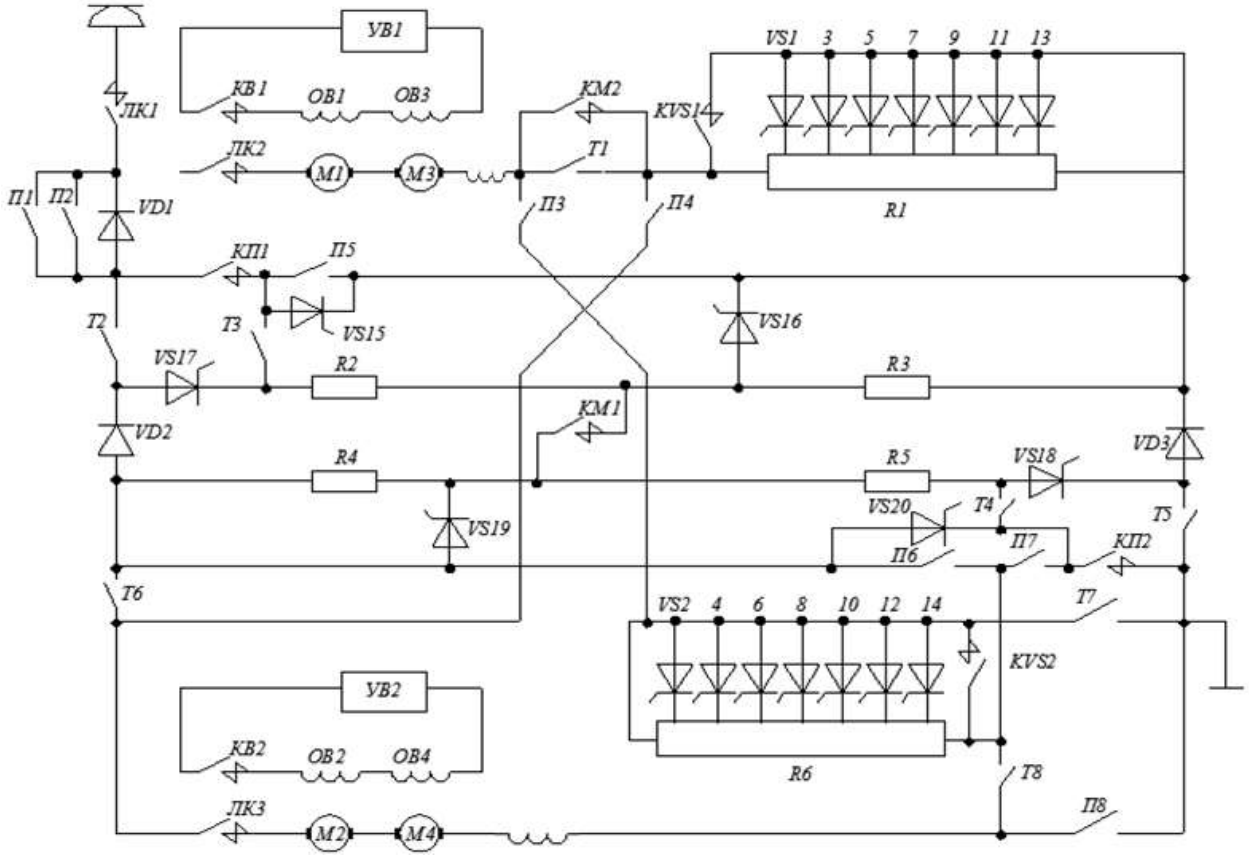


Рисунок 3.1 – Принципова силова схема вагона метрополітену з НВ ТМ та ТРК

Схема забезпечує наступні режими роботи:

реостатний пуск вагона з перегрупуванням груп ТМ та плавним ослабленням поля після виходу на безреостатну характеристику паралельного з'єднання ТМ відповідно до обмежень тягової області;

електричне рекуперативно-реостатне гальмування в діапазоні швидкостей від конструкційної до близької до нуля зі збереженням максимальної гальмівної сили до швидкостей 2-3 км/год, за збереження

рекуперативного гальмування до швидкостей порядку 20км/год без втрати гальмівної сили у випадках зриву рекуперації або зниження швидкості руху до величини, за якої не можна забезпечити необхідну рекуперацію е.р.с. ТМ.

Однією з особливостей схеми є заміна групового реостатного кулачкового контролера тиристорним комутатором (ТК). Застосування ТК обумовлено низькою надійністю серійних реостатних контролерів для ВМ (часті виходи з ладу серводвигунів групового приводу, підгар контактів тощо); їх недостатньою швидкодією, яка не дозволяє реалізувати більш досконалі алгоритми управління ТМ і без суттєвого обмеження числом ступенів регулювання опорів пуско-гальмівних резисторів (ПТР)

З іншого боку, сприятливий режим роботи тиристорів ТК, відсутність жорстких вимог до їх тимчасових характеристик, відсутність комутаційних перенапруг при виведенні ступенів ПТР дозволяє застосувати тиристори низької вартості по одному на кожний ступінь секцій ПТР, що регулюються.

Для зменшення кількості тиристорів ТК у силовій схемі приводу лише дві секції ПТР є регульованими. В результаті при 48 щаблях реостатного пуску ТК включає всього 18 тиристорів (VS1-V514, VS15, VS16, VS12, VS20).

Збільшення числа пускових щаблів дозволяє здійснити практично плавний вихід задану уставку струму якоря, що значною мірою визначає комфортні умови при пуску.

Швидкодія ТК забезпечує поліпшення динамічних показників при повторних пусках та у гальмуванні за рахунок можливості включення режиму тяги (гальмування) відразу на потрібному угрупованні ТМ та будь-якої позиції ТК залежно від швидкості руху.

Крім ТК до складу напівпровідникового силового електроустаткування входить діодно-тиристорний блок рекуперативного гальмування, що включає в себе діоди VDI-VD3 та тиристори VS17, VS18.

Обмотки збудження ТМ ОВ1-ОВ4 підключені попарно послідовно до керованих випрямлячів УВ1, УВ2, які отримують харчування від статичного перетворювача (СТП), на даної схемою не показаного. Від цього ж

перетворювача здійснюється харчування потреб вагона, тому відпадає необхідність установки спеціального блоку живлення потреб (БПСН), що входить до складу електрообладнання серійного вагона. Не використовується також серійний регулятор струму збудження ТМ (РТ-300), функції якого виконують випрямлячі керовані УВ1-УВ2.

Керовані випрямлячі, крім функцій регулювання струму збудження ТМ, здійснюють реверсування його напрямку в обмотках збудження.

На серійному вагоні функцію реверсування напряму руху здійснює спеціальний електропневматичний груповий апарат, необхідність якого на вагоні з НВ ТМ відпадає.

З електрообладнання серійного вагона не використовується також електропневматичний груповий апарат, який забезпечує перемикання схеми силових ланцюгів із послідовного з'єднання ТМ на паралельне та назад (перемикач положень ПС-ПП).

Функції ПС-ПП у схемі з НВ ТМ виконують індивідуальні контактори КП1, КП2 та М1, М2, які спільно з діодно-тиристорним блоком рекуперації забезпечують також включення рекуперативного гальмування та заміщення його реостатним.

Переваги пропонованої системи ТЕП

Зважаючи на такі особливості метрополітенів, як висока вартість капітального будівництва та обмеженість довжини поїзда, основні резерви підвищення їх провізної здатності пов'язані з наростанням частоти і швидкості руху. Однак за умов метрополітену навіть невелике збільшення швидкості повідомлення понад досягнуте в експлуатації веде до різкого зростання витрати енергії на тягу.

Таким чином, при розробці перспективних метровагонів необхідно вирішити два основні завдання:

покращення динамічних показників ЕРС;

зниження витрати енергії на тягу поїздів.

Для вирішення вищезазначених завдань вагони з ДРУ рекомендується обладнати автоматично регульованим незалежним збудженням тягових машин (АР НВ ТМ) [8]. При цьому реалізуються:

поліпшення тягових властивостей у зоні обмеження сили тяги умовами зчеплення в зоні ослаблення поля ТМ відповідно за рахунок підвищення динамічної жорсткості тягових характеристик та регулювання сили тяги згідно з фактично чинним обмеженням при зменшенні розкиду навантажень паралельно включених груп ТМ;

підвищення ефективності гальмівного процесу за рахунок більш плавного регулювання гальмівної сили в зоні високих швидкостей руху та збереження максимальної гальмівної сили до суттєво меншої швидкості руху;

рекуперативне гальмування, що є основним резервним підвищенням енергетичної ефективності ВМ, із здійсненням у цьому режимі перегрупування ТМ;

можливість використання більш ефективних енергозберігаючих алгоритмів управління пускових режимах.

Електромагнітні, електромеханічні та механічні процеси в ТЕП з незалежним збудженням тяговим машин

Розглянемо систему рівнянь, що описують перехідний процес у тяговому двигуні, є системою нелінійних диференціальних рівнянь

Двигун постійного струму з незалежним збудженням має обмотку якоря та обмотку збудження, які в загальному випадку одержують живлення від незалежних джерел постійного струму. Необхідною умовою безперервного процесу електромеханічного перетворення енергії є протікання змінних струмів хоча б щодо обмоток машини. Виконання цієї умови у машині постійного струму забезпечується роботою колектора, комутуючого постійний струм, вступник в якірну обмотку зі сторони джерела харчування, з частотою

Двигун постійного струму незалежного збудження можна описати такою системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} U_в = I_в R_в + L_в dI_в / dt \\ U_я = I_я R_я + L_я dI_я / dt + k\Phi w \\ M_{дв} = k\Phi I_я \\ M_{дв} - M_н = J_\Sigma dw / dt \end{cases}$$

Неважко бачити, що перші два рівняння отриманої системи являють собою рівняння Кірхгофа для ланцюгів збудження та якоря машини, причому останній член рівняння для ланцюга якоря є ЕРС двигуна:

$$e = w_{ел} L_{12} i_в = p_п L_{12} i_в w = k\Phi w$$

Момент двигуна визначається співвідношенням,

$$M_{дв} = p_п L_{12} i_в i_я = k\Phi I_я$$

де $U_в$, $I_в$, $U_я$, $I_я$ - напруги і струми ланцюги збудження і якірний ланцюги,

в, $L_в$, $R_я$, $L_я$ - опору і індуктивності ланцюги збудження якірний ланцюги, взаємна індуктивність обмоток якоря і збудження,

w - кутова швидкість ротора,

$M_{дв}$ - електромагнітний момент двигуна,

$M_н$ - момент навантаження,

- кількість пар полюсів,

J - сумарний момент інерції двигуна та навантаження,

в - число витків обмотки збудження.

Отже, для запису рівнянь механічної характеристики двигуна постійного струму можна, як це прийнято, безпосередньо використовувати схему його ланцюгів на постійному струмі, наведену на рис. 3.2.

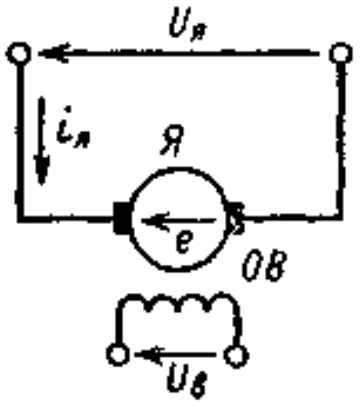


Рисунок 3.2. - Природна схема включення двигуна з незалежним збудженням

Математичне опис механічної характеристики двигуна постійного струму при змінному потоці нелінійно у зв'язку з тим, що ЕРС двигуна е і електромагнітний момент $М_{дв}$ пропорційні добуткам потоку відповідно на швидкість і струм якоря. У багатьох випадках двигун з незалежним збудженням працює при постійному потоці Ф=const, при цьому рівняння механічної характеристики лінеаризуються і після перетворення математичний опис динамічних процесів перетворення енергії в двигуні з незалежним збудженням представляється у вигляді наступного рівняння механічної характеристики:

$$w = \frac{U_я}{к\Phi} - \frac{R_я}{k^2\Phi^2} M_{дв} - \frac{L_я}{k^2\Phi^2} \frac{dM_{дв}}{dt}$$

П

і

д

с

т

а

н

о

в

к

а

$$w = \frac{U_я}{к\Phi} - \frac{R_я}{k\Phi^2} i_я - \frac{L_я}{k\Phi^2} \frac{di_я}{dt}. \qquad (3.5)$$

Як приватний результат отриманого математичного опису можуть бути визначені рівняння статичних електромеханічних та механічних

характеристик двигуна. При постійному потоці рівняння цих характеристик з допомогою (3.4) і (3.5) при $dM_{дв}/dt=di_{я}/dt = 0$ записуються в вигляді

$$w=\frac{U_{я}}{к\Phi}-\frac{R_{я}}{k^2\Phi^2}M_{дв}$$

$$w=\frac{U_{я}}{к\Phi}-\frac{R_{я}}{k\Phi}i_{я}$$

Розглядаючи отримані рівняння, можна зробити висновок, що при Ф=const електромеханічна та механічна характеристики двигуна з незалежним збудженням лінійні. Тому становище кожної характеристики може бути охарактеризовано двома точками: точкою ідеального холостого ходу, в якої $i_{я}$ і (3.7) першою з них відповідає швидкість ідеального холостого ходу:

$$w_0=\frac{U_{я}}{к\Phi}$$

Другий відповідають момент $M_{до.з}$ та струм $i_{до.з}$ короткого замикання. Їх можна визначити, вирішивши (3.6) і (3.7) щодо струму і моменту. Прийнявши в цих рівняннях w = 0, отримаємо,

$$i_{к.з}=\frac{U_{я}}{R_{я}}, M_{к.з}=k\Phi\frac{U_{я}}{R_{я}}$$

На основі кривий намагнічування Ф(I) визначено статична $L_{ст}$ ($I_{ст}$) та динамічна $L_{дин}$ ($I_{в}$) індуктивності тягового двигуна.

$$L_{ст}\left(I_{в}\right)=2p\cdot\sigma\cdot\frac{w_{в}\Phi}{I_{в}}$$

де σ - коефіцієнт розсіювання; w в - число витків обмотки збудження.

$$L_{дин}=L_{ст}+I_{в}\cdot\frac{\Delta L_{ст}}{\Delta I_{в}}$$

де Δ $L_{ст}$ - приріст статичної індуктивності;

Струми якоря та збудження

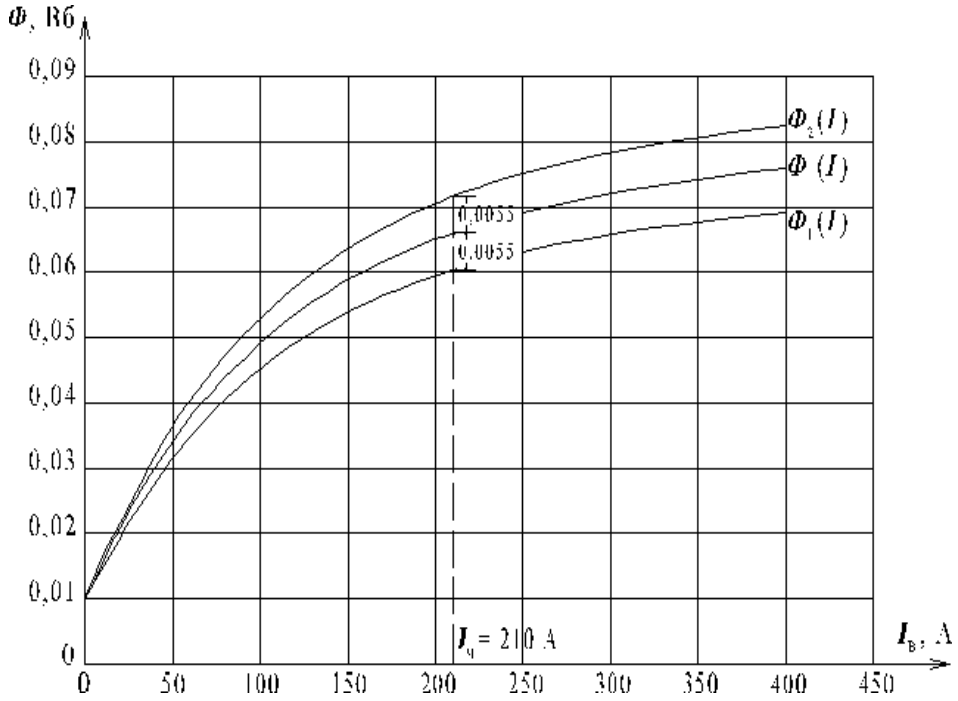


Рисунок 3.3. - Залежність індуктивності тягового двигуна

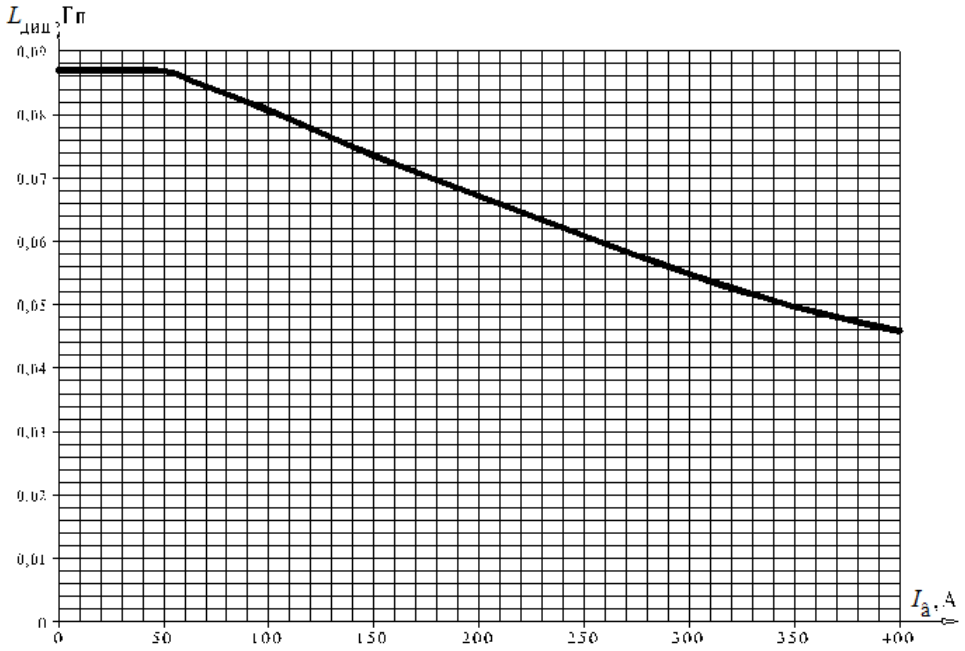


Рисунок 3.4. - Залежність індуктивності тягового двигуна обмотки збудження двигуна від струму

Дослідження електромагнітних процесів на вагоні метро з незалежним збудженням виконано з урахуванням зміни швидкості руху поїзда в режимах розгону до заданого значення та вибігу.

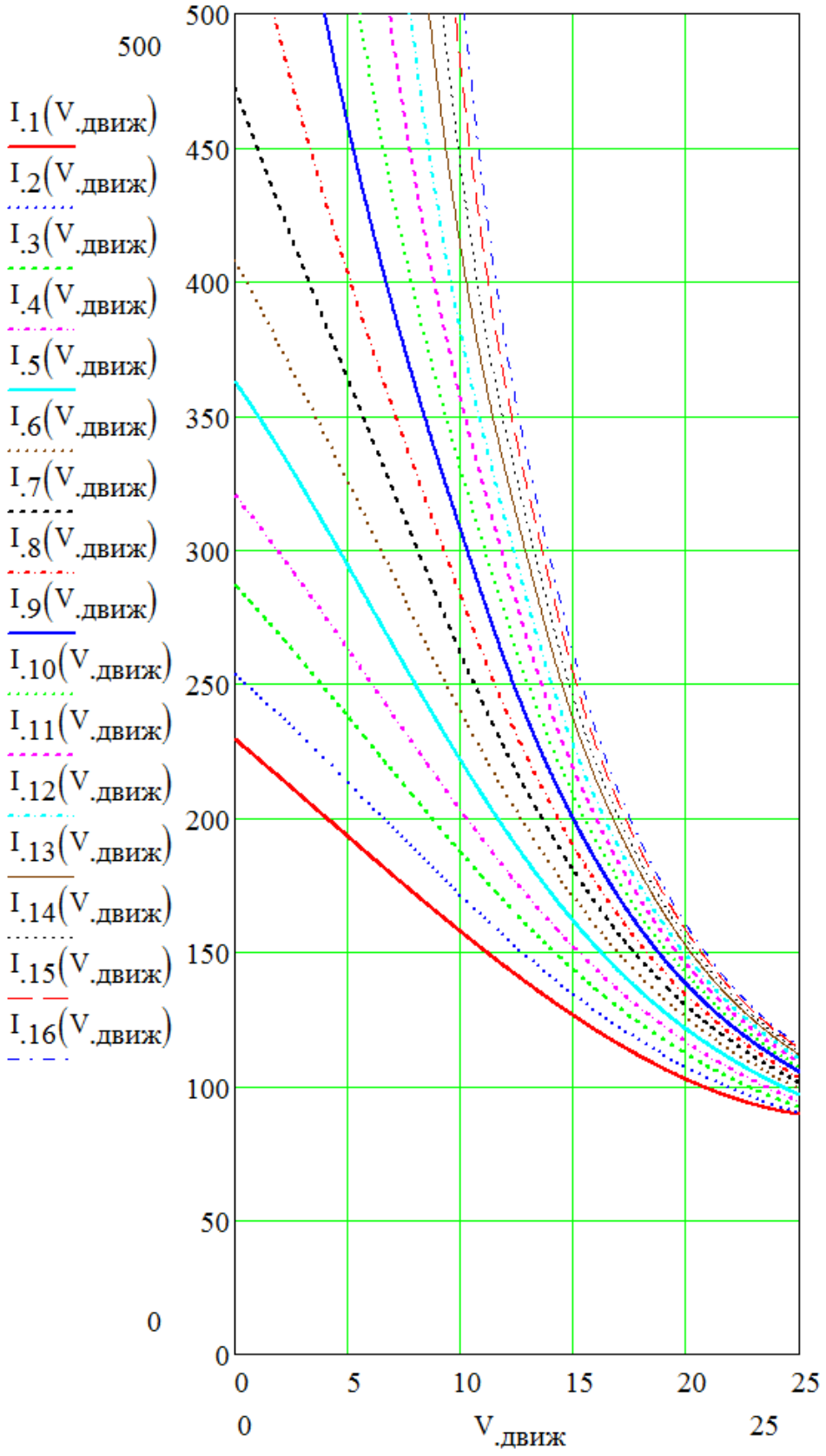


Рисунок 3.5. - Електромеханічні характеристики на послідовному з'єднанні ТМ

Зміна швидкості враховувалася за допомогою рішення рівняння руху поїзда (рис. 3.5), яке записано у вигляді:

$$\frac{dv_{\text{дв}}}{dt} = f_{\text{д}}\xi$$

де $f_д$ - питома рівнодіюча всіх сил, діючих на поїзд;

ξ - перекладний коефіцієнт, враховує розмірності величин.

$$_{\text{д}} = f_{\text{до}} \mp w \mp w_i - b \qquad (3.14)$$

де $f_{до}$ - питома сила тяги; w – питома сила опору руху поїзда (знак «+» відповідає режиму тяги, а знак «–» – режиму гальмування); w_i – питома сила опору руху поїзда від нахилу (+), підйому (−); b - питома гальмівна сила.

$$f_{\text{к}} = \frac{F_{\text{к}}}{G}$$

де $F_к$ - сила тяги вагона; G - вага вагона метрополітену.

При рішенні нелінійною системи диференціальних рівнянь (3.1)−(3.15) побудовано графіки.

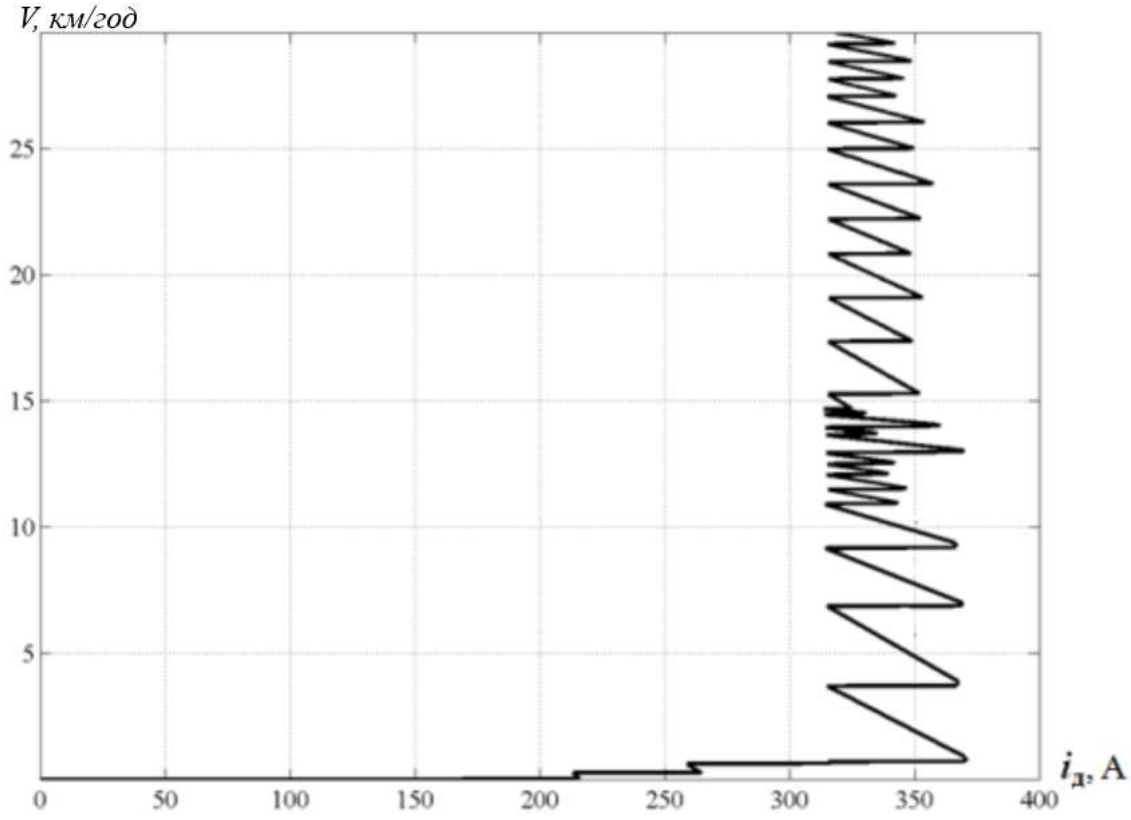
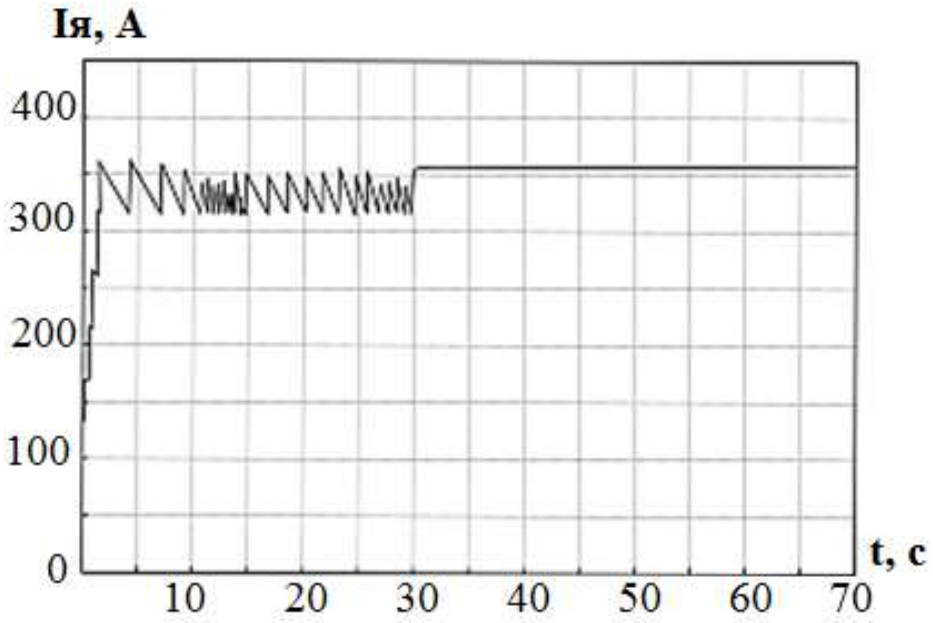
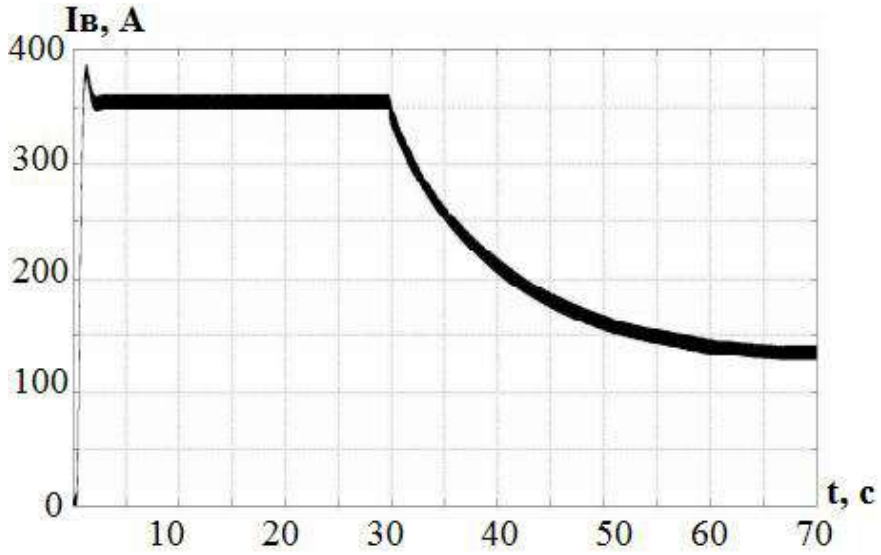


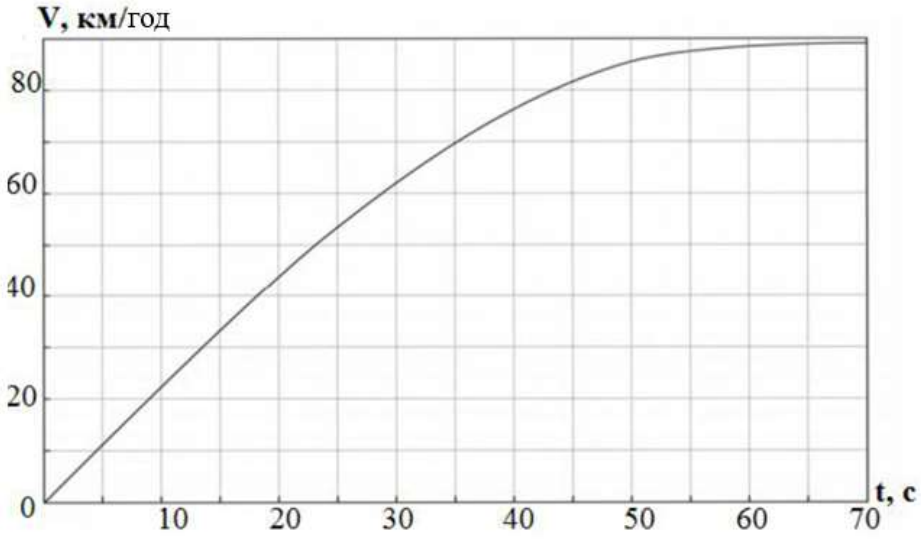
Рисунок 3.6. - Реалізована пускова діаграма вагона метрополітену



а)



б)



в)

Рисунок 3.7. - Графіки зміни струму якоря (а), струму збудження (б) і швидкості руху вагона (в) під час роботи системи автоматичного регулювання для стабілізації струму після виходу на автоматичну характеристику

Як бачимо на рис. 3.7 після включення системи стабілізації на 30с струм збудження починає знижуватися, за рахунок чого відбувається підтримка струму якоря на заданому рівні та відбувається подальше зростання швидкості.

3.4. Порівняльний аналіз тягово-енергетичних характеристик запропонованої системи ТЕП на дослідних вагонах метрополітену

3.4.1. Тягові характеристики пропонованої системи ТЕП на дослідних вагонах метрополітену

У специфічних умовах метрополітенів дія одних позитивних якостей АР НВ ТМ послаблюється, інших посилюється. Зокрема, аналіз показує, що тягова область метровагонів практично не має обмежень. за умовами зчеплення. Тому одна з переваг АР НВ ТМ покращення протибоксувальних властивостей, має найважливіше значення для локомотивів, для метрополітену несуттєво. Інші переваги АР НВ ТМ повною мірою виявляються й за умов метрополітену.

Основними елементами електричного обладнання, ступінь стабільності характеристик яких відбивається на розкидах сил тяги та гальмування окремих колісних пар, є ТМ, пуско-гальмівні резистори (ПТР), реле прискорення та гальмування (РУТ), опору ланцюгів ослаблення поля ТМ. Додатковий вплив на розкид сил тяги та гальмування мають різниця діаметрів бандажів колісних пар і температур нагрівання обмоток ОВ тягових машин. Остання в режимах ослаблення поля може призвести до помітного розкидання сил тяги та гальмування навіть за однакових характеристик ТМ та ланцюгів ослаблення поля.

Математична обробка даних контрольних випробувань 400 машин типу ДК-108 та 800 машин типу ДК-116 показала, що у 85% машин типу ДК-108 у номінальному режимі відхилення частот обертання не перевищують ±2,6%; для 82,5% машин типу ДК-116 відхилення частот обертання лежать у межах ±3,0%. Основною причиною відхилень частот обертання ТМ є відмінність їх потоків збудження при рівних магніторушійних силах в обмотках збудження. Тому можна вважати, що потоки машин приблизно мають такий самий розкид, як їх частоти обертання. Під час руху поїзда частоти обертання його машин задані примусово, і їх відхилення визначаються лише різницею діаметрів коліс.

У зв'язку з цим при послідовному збудженні розкиди магнітних характеристик і відхилення частот обертання ТМ викликають відмінність струмів і, отже, неоднакові потужності ТМ, що реалізуються, при паралельному їх включенні, як це має місце на електровозах змінного струму.

На моторних вагонах постійного струму, зокрема метрополітену, використовується перегрупування ТМ та реостатний пуск. Це вносить свої особливості у розкид навантажень ТМ. При послідовному угрупуванні всі ТМ одного вагона включені послідовно, їх струми дорівнюють і в режимі реостатного пуску визначаються роботою РУТ. У цьому вся режимі розкид показників ТМ викликає перерозподіл прикладених до них напруг, тобто. також призводить до різних реалізованих потужностей та сил тяги осей одного вагона. Розкид параметрів РУТ викликає відмінності в силах тяги різних вагонів. При паралельному угрупуванні в режимах зміни опору пускових резисторів та ступеня ослаблення поля вплив характеристик РУТ на розкид сил тяги вагонів зберігається і, крім того, поступово зростає вплив розкиду характеристик ТМ та пристроїв ослаблення поля на різницю навантажень паралельних кіл ТМ одного вагона

Теоретичний розрахунок відхилень характеристик вагонів від номінальних та розкиду навантажень їх ТМ досить складний. Тому для оцінки цих параметрів в одному з депо метрополітену було випробувано чотири вагони серії Е. Випробування показали суттєву відмінність установок РУТ окремих вагонів та можливість значного розкидання навантажень паралельних груп ТМ одного вагона. Так, на двох вагонах навантаження паралельних груп ТМ суттєво відрізнялися один від одного. На одному з них при зменшенні середнього струму якір з 404 до 162 А (на автоматичній характеристиці) розкид збільшився з 7,4 до 14%.

Тягові характеристики, розраховані за одержаними у випробуваннях осцилограмами, свідчать про істотні недоліки системи контакторно-реостатного регулювання сили тяги з ТМ послідовного збудження во всіх зонах тяговий області. Ці недоліки, що приводять до недовикористання

тягових можливостей вагонів та погіршення їх динаміки, здебільшого усуваються при обладнанні вагонів системою АР НВ ТМ.

У зоні наростання прискорення (при струмах якорів, менших за уставку РУТ) вплив розкиду характеристик приводу реостатного контролера (РК) можна усунути, вибравши величину першого ступеня пускового реостата такий, щоб струм якорів досягав уставки при максимальній напрузі в КС, а силу тяги регулювання. Використовуючи датчики струмів системи, легко створити електронне РУТ з набагато стабільнішими характеристиками і тим самим покращити регулювання сили тяги на реостатних позиціях. У зоні роботи з ослабленим полем система АР НВ ТМ забезпечує плавне зменшення струмів збудження до допустимого значення незалежно від нагрівання ОВ, автоматично коригує допустимий ступінь ослаблення поля в залежності від рівня напруги в КС і вирівнює навантаження паралельних груп ТМ за рахунок зміни струмів їх збудження. Цим досягається регулювання сили тяги за розрахунковими обмеженнями, що дозволяє істотно збільшити силу тяги в зоні з граничним ослабленням поля, особливо при зниженій напрузі КС.

Використання АР НВ ТМ забезпечує суттєве зниження впливу напруги в КР на величину сили тяги завдяки можливості плавної корекції ступеня ослаблення поля. В результаті з'являється можливість регулювати силу тяги відповідно до всіх обмежень, що діють при даній швидкості руху. На ВМ такими обмеженнями є спочатку допустимий струм якоря, а потім максимальна міжламельна напруга на колекторі.

Про потенційну ефективність застосування АР НВ ТМ на вагонах типу Е свідчать наведені на рис. 3.8 тягові характеристики, розраховані для напруги 750В. Крива 1 відповідає режиму послідовного збудження з мінімальним ослабленням поля =0,42 . яке дещо менше, ніж отримане при випробуваннях значення 0,44; крива 2 відповідає розрахункової величини β =0,35. на перший погляд, різниця між характеристиками 1 і 2 незначна, проте за швидкості 60 км/год відмінність за силою тяги перевищує 10%, що з динаміки поїзда істотно. Крива 3 розрахована для режиму АР НВ ТМ при граничному струмі

якоря 350 А та максимальній міжламельній напрузі 37,5 В; при цьому допустиме значення реактивної е. д. с. не досягається. Величина 350 А прийнята як допустима тому, що на вагонах типу Е в зоні регулювання ослаблення поля при уставці РУТ 260А кидки струму в у разі високої напруги в КС перевищують 350 А навіть за нормальної роботи пристроїв ослаблення поля.

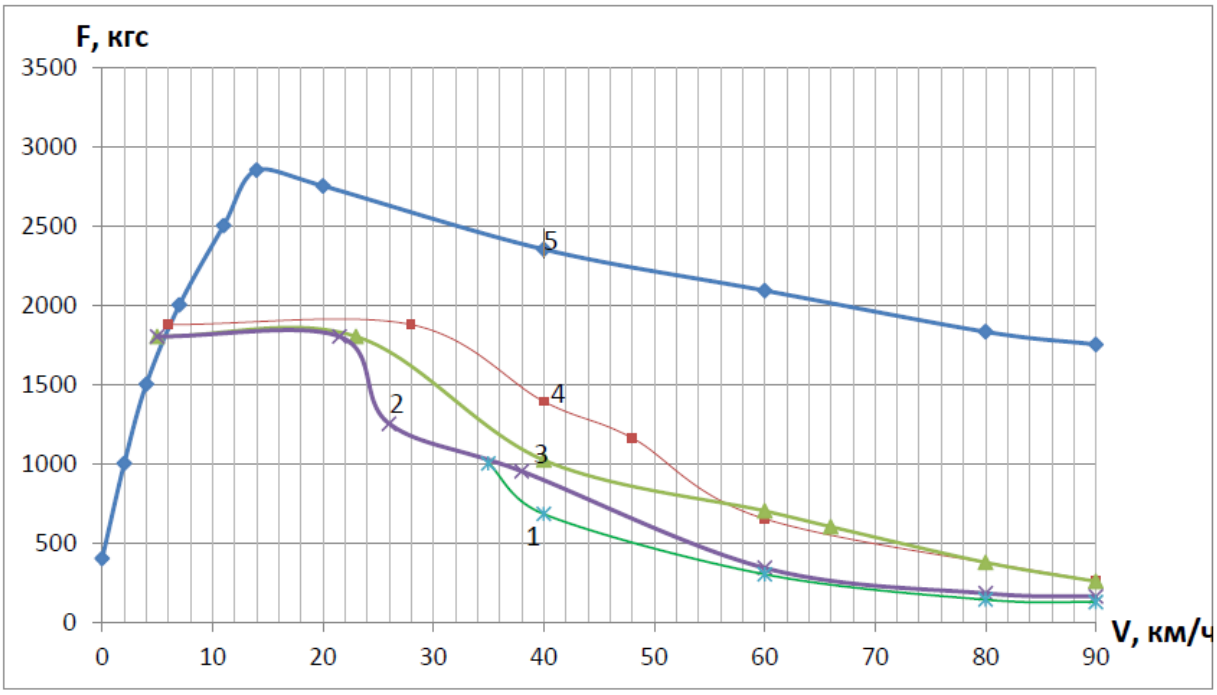


Рис 3.8. - Тягові характеристики дослідного вагона при застосуванні АР НВ ТМ

Порівняння характеристик 1 та 3 показує високу ефективність застосування АР НВ ТМ. Зокрема, за швидкості 60 км/год сила тяги збільшується вдвічі. Розширення тягової області у зоні високих швидкостей руху порівнянно з досягається шляхом збільшення потужності ТМ. Це випливає з порівняння характеристики 3 з кривою 4, яка є обмеженням тягової області вагона типу 81-717 з машинами потужністю 110 кВт (тобто на 66 % вище, чим на вагонах типу Е) в режимі послідовного збудження з розрахункове значення β =0,28. Фактично в експлуатації реалізується величина близько 0,35 і тягова характеристика буде розташована нижче.

Для оцінки граничних тягових можливостей вагонів метрополітену та ступеня їх використання на експлуатованому парку наведено характеристика 5 , розрахована для однієї рушійної осі при навантаженні від неї на рейки 12 т з урахуванням наступних обмежень: пускове прискорення а 0 =0,4 м/с 2 похідна максимального прискорення по часу h = 0,6 м/с 3 і коефіцієнт зчеплення **Ψ**к = 25/(100+V). Порівняння характеристики 5 з 1, 2 і навіть з 4 показує, що можливості покращення тягових властивостей вагонів метрополітену використано далеко не повністю.

Реалізація цих резервів шляхом збільшення потужності ТМ обмежена параметрами системи електропостачання та допустимою масою та габаритами електрообладнання. Дійсно, для забезпечення сили тяги, що відповідає характеристиці 5, потужність ТМ при швидкостях 70 та 90 км/год повинна досягати відповідно 340 та 400 кВт. При сучасному рівні електромашинобудування це неможливо. Істотно й обмеження граничного струму в контактній мережі: саме цим параметром обмежена сила тяги вагонів 81-717 в інтервалі швидкостей руху від 15 до 50 км/год. У разі застосування АР НВ ТМ істотне розширення тягової області досягається без зміни параметрів електрообладнання вагонів.

Щоб достовірно та всебічно оцінити ефективність прийнятих рішень у галузі вдосконалення тягового приводу, необхідно провести порівняльні тягові розрахунки. Такі розрахунки дозволяють встановити як динамічні, так і енергетичні показники вагонів з різними системами приводу. Проте результати такої оцінки великою мірою залежить від умов, котрим виконані тягові розрахунки. До таких умов відносяться довжина перегону, профіль шляху, технічна швидкість (V т), режим напруги в контактній мережі, завантаження вагонів, опір руху.

Наприклад, при малій довжині перегону навіть при русі з граничними прискореннями поїзд не встигає розвинути високою швидкості і тому проблема збільшення сили тяги у зоні високих швидкостей втрачає свою актуальність. Навпаки, при довгому перегоні величина сили тяги у зоні

високих швидкостей руху набуває основного значення. Якщо всі станції розташовані на гірках, пуск поїзда відбувається на спуску, а гальмування — на підйомі. У цьому випадку знижуються вимоги до величини сили тяги в зоні розгону поїзда та до гальмівної сили; в зокрема, інакше може розглядатися проблема рекуперації. Тому для тягових розрахунків слід використовувати усереднені, найімовірніші умови.

Наведені міркування дозволили вибрати в якості розрахункового номінальну напругу в контактній мережі 750 В. Аналіз параметрів шляху ліній метрополітену показав, що незважаючи на великий розкид величин ухилів на ділянках розгону і гальмування поїздів математичне очікування цих величин близьке до нуля, а середня довжина перегонів дорівнює 10. враховуючи вартість пасажиро-години, показують, що мінімум наведених витрат досягається при $V_т$ >60 км/год. Тому необхідно було оцінити ефективність удосконалення тягового електроприводу як для існуючих, але й раціональних у перспективі значень $V_т$ межах до 60 км/год.

На динамічні та енергетичні показники електропоїздів істотно впливає ефективність гальмівного процесу. На поїздах метрополітену використовується реостатне гальмування, у процесі якого напруга на колекторах ТМ удвічі перевищує номінальну. Це забезпечує високу ефективність гальмівного процесу. На вагонах з АР НВ ТМ можна використовувати рекуперативно-реостатне гальмування. Однак враховуючи велику ймовірність зривів рекуперації через відсутність споживання енергії в мережі або з інших причин та виняткову важливість надійності гальмівних засобів у метрополітені, як робоче гальмо слід приймати реостатний. Крім того, досягнення в режимі рекуперації рівного з режимом реостатного гальмування ефекту є, як зазначалося, складним завданням, яке практично вирішується лише включенням у ланцюг гальмівного струму баластових резисторів. З урахуванням цих міркувань у тягових розрахунках для всіх варіантів обмежень сил тяги приймалася та сама гальмівна характеристика —

реостатного. гальма вагонів типу е. Практично це означає, що гальмівна сила у процесі гальмування залишається майже постійною та рівною 1,96 тс/вісь.

Енергетичні характеристики пропонованої системи ТЕП на макетних вагонах метрополітену

Деякі результати серії тягових розрахунків, виконаних за спеціально розробленою методикою [4], наведено на рис. 3.9. Зображені на ньому криві рухи відповідають тяговим характеристикам, показаним на рис. 3.8. Криві рис. можливості досягнення тій ж швидкості руху за менше час та збільшення $V_т$. Зокрема, з урахуванням того, що графік руху на метрополітені повинен мати 10-секундний запас на нагін, для поїзда з тяговими характеристиками вагонів типу Е при βmin =0,42 максимальна технічна швидкість становить 54,8 км/год; застосування цих же вагонах АР НВ ТМ дозволяє збільшити її до 60 км/год.

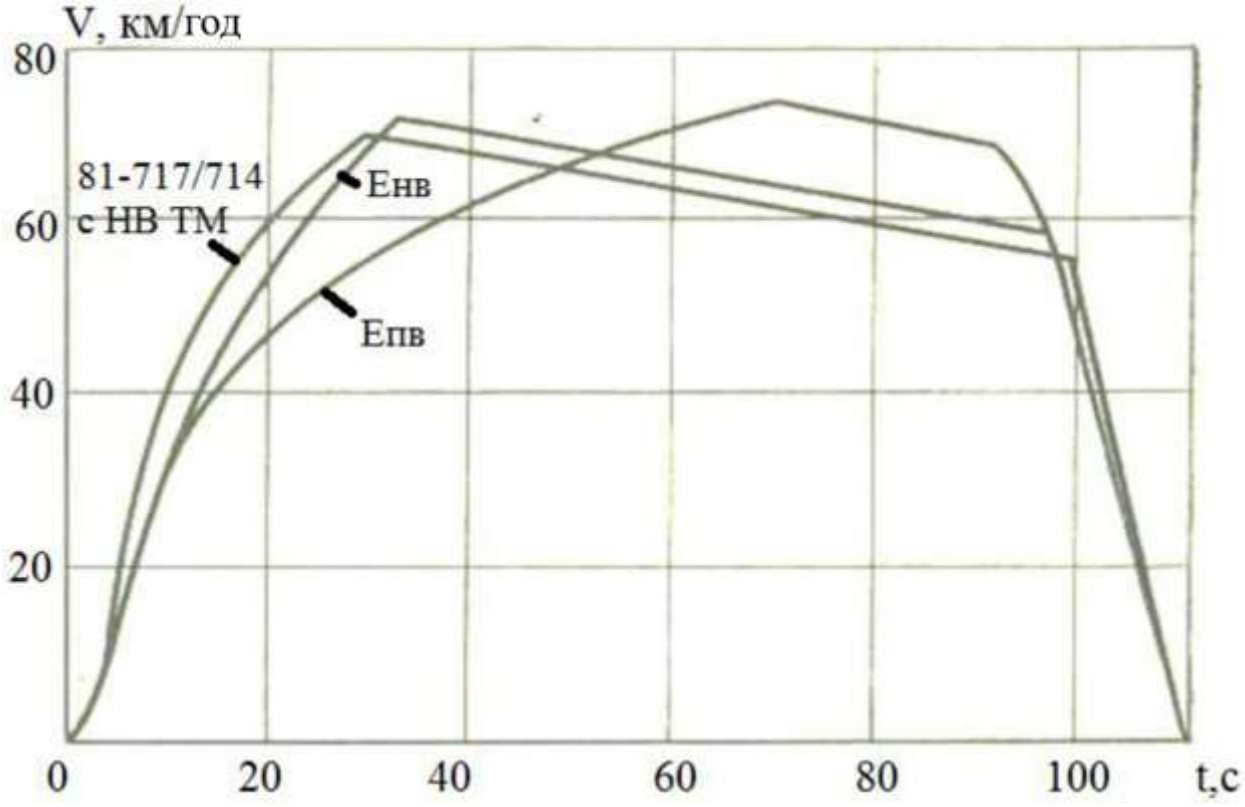


Рисунок 3.9. - Криві рухи вагонів метро 81-717 з АР НВ ТМ

Можливості покращення енергетичних показників поїздів серії Е при обладнанні вагонів системою АР НВ ТМ показано на рис. 3.10. На ньому наведено залежності питомої витрати енергії від технічної швидкості для вагона з послідовним збудженням машин при β =0,42 ($E_{пв}$), для вагона з системою АР НВ ТМ ($E_{нв}$) та для того ж вагона з урахуванням повернення енергії до мережі при рекуперативно-реостатному гальмуванні ($E_{нвр}$). Остання характеристика отримана з урахуванням втрат енергії у баластових резисторах, але не враховуючи можливих зривів рекуперації; не враховуються також втрати енергії у системі електропостачання та її витрати на збудження тягових машин при АР НВ ТМ.

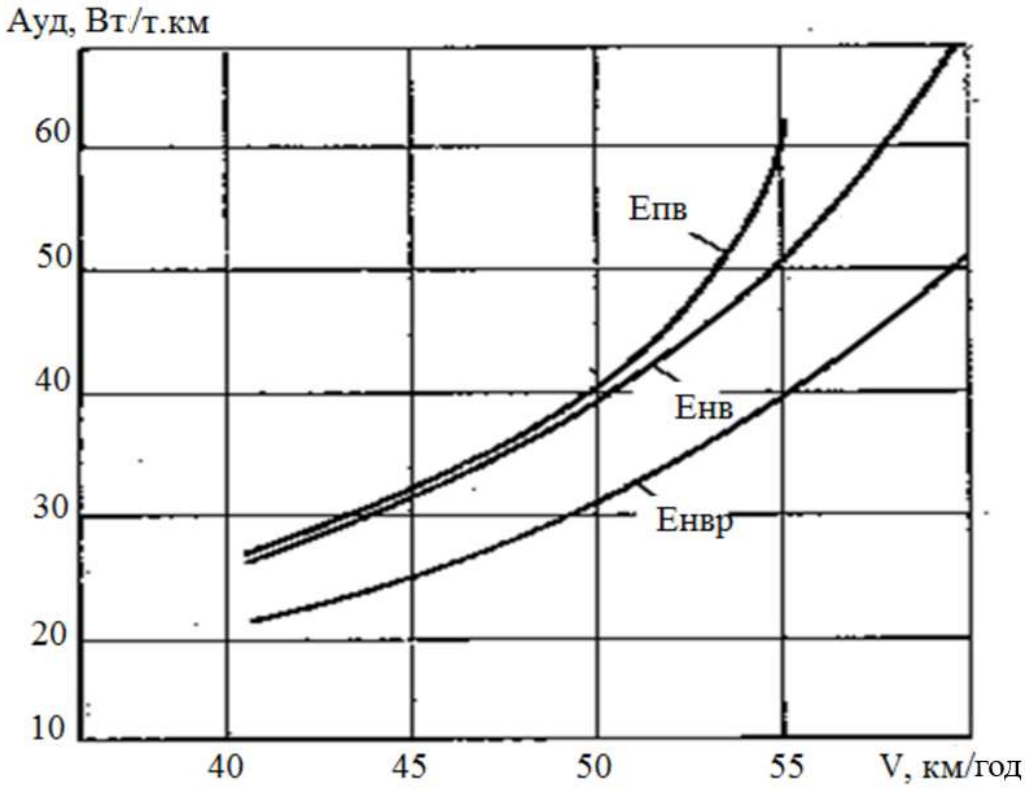


Рисунок 3.10. - Можливості покращення енергетичних показників досвідчених вагонів серії Е при обладнанні вагонів системою АР НВ ТМ

Деякі показники, що відображають можливість покращення тягово-енергетичних характеристик вагонів метрополітену, наведено в табл. 3.1.
З цих даних видно, що тягово-енергетичні показники поїздів метрополітену серії Е помітно покращуються при заміні послідовного збудження незалежним автоматично регульованим. Зокрема, за технічної швидкості 54,4 км/год витрати електроенергії на тягу скорочуються на 11,5%, а гальмівні втрати на 27,7%. Таке поліпшення тягово-енергетичних показників близьке до відповідного ефекту, що отримується при введенні в експлуатацію поїзда 81-717 з розрахунковою характеристикою.

Таблиця 3.1 – Порівняльні тягово-енергетичні показники дослідних вагонів метрополітену серії Е з ПВ, НВ та АР НВ ТМ

Параметри	Тип вагона		
	ПВ	НВ	Вагон с АР НВ ТМ
Час розгону, с			
Питома витрата енергії на тягу, Вт.ч/т.км (%)			
Швидкість початку гальмування , км/год			
Гальмівні втрати, %			

Слід зазначити, що цей результат виходить за рахунок використання однієї переваги АР НВ ТМ — плавного регулювання струму якоря. Використання інших його переваг, таких як усунення розкиду навантажень ТМ у всіх режимах та регулювання сили тяги за допустимими значеннями обмежувальних параметрів при всіх рівнях напруги контактної мережі, дозволить ще більше розширити тягову область поїздів типу Е та наблизити її до тягової області поїздів типу 81-717.

Важливою перевагою розглянутої можливості покращення показників вагонів типу Е є простота здійснення модернізації. Необхідні при цьому зміни схеми силових ланцюгів невеликі. Основним додатковим обладнанням є статичний перетворювач постійної напруги контактної мережі в змінне, яке використовується для живлення збудників, що є тиристорними випрямлячами.

Тиристорні збудники забезпечують реверсування струму в обмотках збудження. Статичний перетворювач служить також для харчування потреб вагона.

У зв'язку із заміною системи збудження ТМ зі схеми усуваються ланцюги ослаблення поля, включаючи індуктивні шунти, резистори та відповідну апаратуру, що комутує. Крім того, з'являється можливість зняти з вагона гальмівний перемикач, а для перемикання схеми з тягового режиму в гальмівний застосувати реверсор та індивідуальні контактори. Проведені на дослідному вагоні типу Е випробування показали практичну здійсненність НВ ТМ, що автоматично регулюється, та підтвердили його переваги.

Окрім покращення динамічних та енергетичних показників поїздів метрополітену застосування АР НВ ТМ полегшує вирішення проблеми впровадження на метрополітені рекуперативного гальмування та автоведення поїздів. Основні переваги НВ ТМ зберігаються і при його застосуванні на поїздах з тиристорно-імпульсним керуванням, зокрема спрощується здійснення режиму рекуперативно-реостатного гальмування. Техніко-економічна доцільність використання НВ ТМ на поїздах метрополітену з контакторно-реостатним та ТІУ підтверджується і досвідом закордонних метрополітенів.

4. Тягово-енергетичні показники вагонів метро з різними системами тягового електроприводу

Ефективність перевізного процесу метрополітену багато в чому визначається техніко-економічними показниками використовуваного ЕРС, зокрема тягового електроприводу.

З урахуванням специфіки проектованої системи існує проблема вибору кількох альтернатив систем ТЕП з колекторними та асинхронними тяговими двигунами. Обґрунтований вибір з урахуванням майбутніх особливостей експлуатації дозволить знизити експлуатаційних витрат, підвищити надійність ЕРС і, як наслідок, зробити проектований метрополітен ефективною транспортною системою.

У зв'язку з цим для вибору раціональних систем ТЕП вагонів метрополітену необхідне зіставлення їхньої ефективності. Для цього було необхідне проведення комплексного дослідження, що включає:

Тягово-енергетичні розрахунки;

Техніко-економічні розрахунки.

4.1. Методика та технічні дані для тягово-енергетичних розрахунків

Визначення тягово-енергетичних показників вагонів метрополітену з різними системами ТЕП проводиться на основі тягових розрахунків у середовищі пакету MatCAD, графіки та діаграми побудовані комп'ютерною програмою Microsoft Excel [14].

У розрахунках використано параметри (технічні характеристики) серійного вагона типу 81-717/714 для двох варіантів ТЕП:

1. з тяговий машиною постійного струму ДК -117А
2. з асинхронними тяговими машинами ДАТЕ-170 4У2

Розрахунок відрізняється лише типом тягових двигунів і системою управління, у тому числі, масою електрообладнання, маючи при цьому такий самий кузов і візки (табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Технічні дані для тягово-енергетичних розрахунки

Конструкції і технічні показники ЕРС		
Тара вагона, $m_т$ (т)		
Кількість місць для сидіння		
Місткість вагона при щільності 10 чол/м^2, чол		
Середня маса одного пасажира, $m_л$ (т)		
Конструкційна швидкість, $V_{констр.}$ (км/год)		
Швидкість повідомлення (при розрахунку), $V_{повідомл}$ (км/год)		
Передавальне число редуктора, μ		
Діаметр колеса, $D_к$ (м)		
Характеристики тягових електродвигунів		
Тип двигуна	З тяговою машиною постійного струму ДК - 117А	З асинхронними тяговими машинами ДАТЕ-170 4У2
Потужність номінальна, кВт		
Коефіцієнт корисного дії (ККД), η (%)		
Номінальна частота обертання, $n_{ном}$ (об/хв)		
Максимальна частота обертання, n_{max} (об/хв)		
Коефіцієнт ослаблення поля, β		
Маса двигуна, $G_д$ (кг)		
Маса комплекту електрообладнання, $G_{обл.}$ (кг)		
ККД перетворювача, η пр (%)		
Коефіцієнт потужності		

4.2. Тягово-енергетичні розрахунки вагонів метро з ТМ ПТ

4.2.1. Криві питомої основного опору руху

Спочатку, визначимо маси, ваги ЕРС по даними відомостям (Табл. 4.1)

Маса вагона з пасажирами $m_в = m_Т + 330 \cdot m_{люд} = 57{,}1$ т (4.1)

Вага вагона з пасажирами $G_В$=9,81$m_В$=560,15кН (4.2)

Кількість вагонів поїзди $n_{\text{в}} = 8$

Маса поїзда з пасажирами $m_{\text{П}} = n_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}} = 456{,}8$ т (4.3)

Вага поїзда з пасажирами $G_{\text{П}} = n_{\text{в}} \cdot G_{\text{в}} = 4481{,}2$ кН (4.4)

Криві питомої основного опору руху при русі під струмом $w_0^{Т}$ і без струм $w_0^{б/Т}$ (Н/кН) для вагонів метрополітену будуються за виразами:

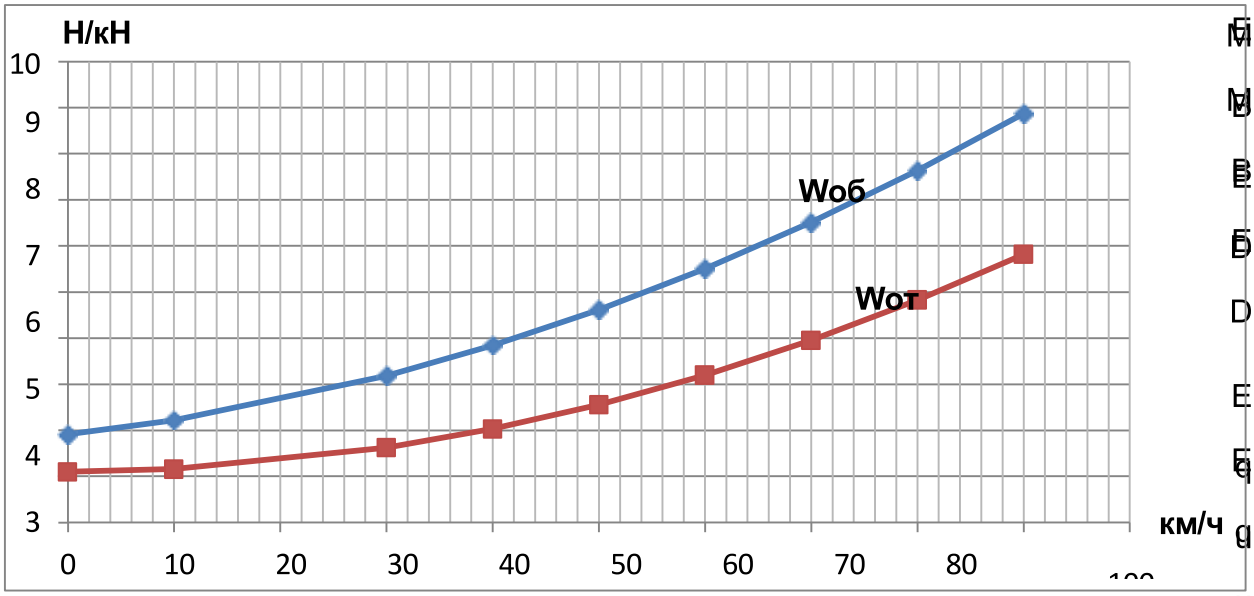


Рисунок 4.1. - Криві питомої основного опору руху

4.2.2. Розрахунок електромеханічних характеристик

Автоматична електромеханічна характеристика

Уявимо вихідну електромеханічну характеристику, отриману із довідника, у вигляд табл. 4.1

Таблиця 4.1 - Електромеханічні характеристики тягового двигуна ДК-117

д, А		Посилене поле (α=100%)		Нормальне поле (α=50%)		Ослаблене поле (α=35%)		
v, км/ч	д, Н	ηэ, %	v, км/ч	д, Н	ηэ, %	v, км/ч	д, Н	ηэ, %

Автоматична електромеханічна характеристика на паралельному з'єднанні ТЕД при повному полі зображена на рисунку 4.2.

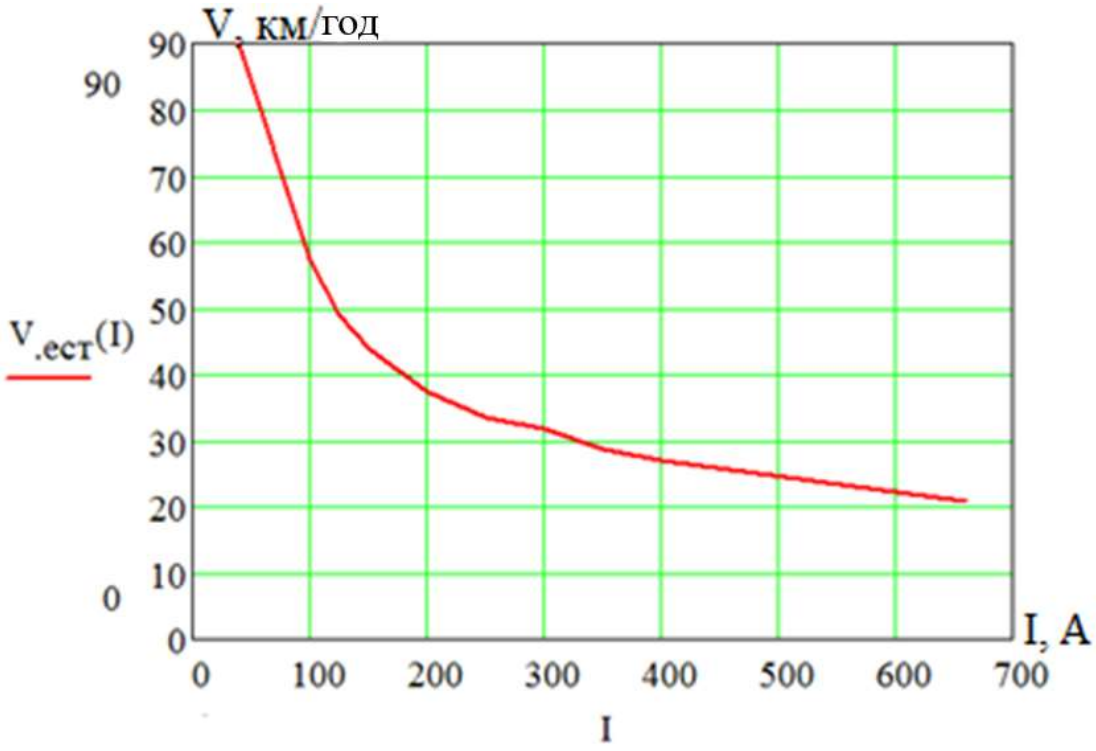


Рисунок 4.2. - Автоматична електромеханічна характеристика на паралельному з'єднанні ТМ при повному полі

Для побудови електромеханічних характеристик на обід колеса необхідно побудувати безреостатную електромеханічну характеристику при

послідовному з'єднанні ТМ, тобто електромеханічну характеристику при зміненому значенні напруги:

$$V_{\text{сс}} = V_{\text{повн}} \cdot \frac{U_{\text{сс}} - R_{TM}}{U_{\text{пс}} - R_{TM}}$$

де $V_{\text{повний}}$ - швидкість, яка визначається по відомої характеристиці $V_{\text{ест}}(I)$ при напрузі U і струмі I;

$V_{\text{сс}}$ - швидкість, яку необхідно знайти при зміненій напрузі $U_{\text{сс}}$ і тому ж струмі I.

У даному випадку $U_{\text{пс}}$ = 375 В - напруга на двигуні при паралельному з'єднанні $U_{\text{ксп}}$ = 750 В .

U сс = 750/4 = 187,5 В (напруга двигуна при послідовному з'єднанні ТМ).

У розрахунках опір двигуна:

$$R_{\text{ТМ}} = R_{\text{я}} + R_{\text{д.п}} + R_{\text{в}} = 0{,}041 + 0{,}0135 + 0{,}045 = 0{,}0995 \text{ Ом} \quad (4.8)$$

Отримуємо безреостатну електромеханічну характеристику, наведену на рис. 4.3.

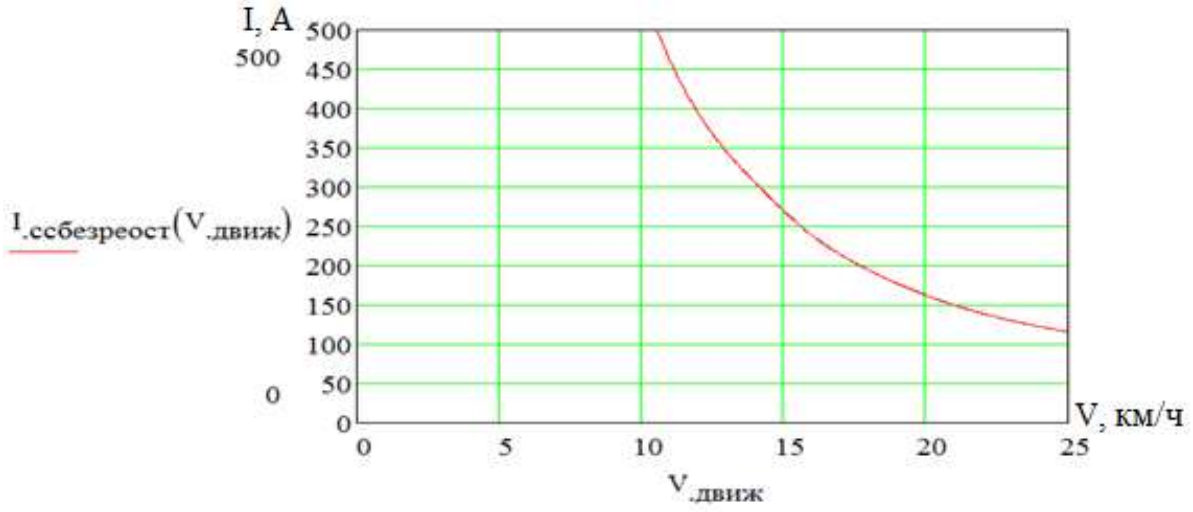


Рисунок 4.3. - Безреостатна електромеханічна характеристика при послідовному з'єднанні ТМ

Характеристика $F_{\text{сс}}(I)$ при новій напрузі приймається тією ж, що і при напрузі. Характеристика $\eta_{1\,\text{n}}$ (I) при $U_{1\text{n}}$ розраховується за висловом:

де η - ККД при напрузі U і струмі I; $\eta_{сс}$ - ККД при напрузі $U_{сс}$ і струмі I. Результати розрахунку наведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Електромеханічні характеристики ТМ при зміні напрузі

$I_д$, А	V, км/год	$F_д$, Н	$\eta_е$, %	$V_{сс}$, км/год	$\eta_{сс}$, %
100	57,5	1860	82,5	27.966	87,27
125	49	2790	84,5	23.66	87,275
150	43,8	3920	85,5	20.992	86,78
200	37,5	6220	86,4	17.699	85,24
250	33,6	8720	86	15.606	83,05
300	31,9	11270	85,5	14.159	80,81
350	28,7	13920	84,7	12.881	78,42
400	27	16610	83,9	11.897	76,03

. Електромеханічні характеристики на послідовному з'єднанні ТМ

Розрахуємо електромеханічні характеристики на обід колеса на послідовному з'єднанні двигунів для всіх реостатних позицій.

Величини опорів кожної позиції реостатного контролера для послідовного з'єднання (С-з'єднання) і паралельного з'єднання (П- з'єднання) однією двигун (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 - Величини опорів позиції реостатного контролера

Позиції	Величина опорів, Ом	
	С-з'єднання ($R_{сс}$)	П-з'єднання ($R_{пс}$)

Розрахунок буде здійснюватися за виразом

R_{cc} - опір кожної позиції реостатного контролера на послідовному з'єднанні.

Аналогічний алгоритм розрахунок проводиться для всіх реостатних опорів позиція, змінюючи значення опорів відповідних кожній позиції.

. Електромеханічні характеристики на паралельному з'єднанні ТМ

Спочатку, визначимо криву намагнічування. Скористаємося виразом:

Усі розрахункові значення при зміні струму зведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

I	100	125	150	200	250	300	350	400
сФ	6,35	7,40	8,22	9,47	10,42	10,82	11,85	12,41

За даними таблиці будуємо навантажувальну характеристику (Рис. 4.4)

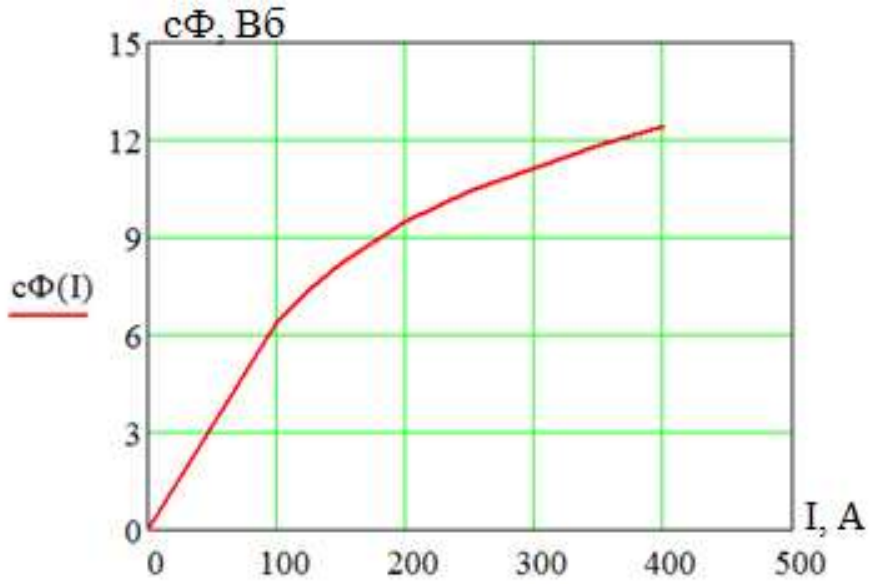


Рисунок 4.4. - Навантажувальна характеристика ТМ ДК-117

Розрахуємо електромеханічні характеристики на обід колеса на паралельному з'єднанні двигунів для всіх реостатних позицій.

Розрахунок буде здійснюватися за виразом

$$сФ = \frac{U_{пс} - I \cdot R_{ТМ}}{V}$$

$R_{пс}$ - Опір на кожній позиції реостатного контролера на паралельному з'єднанні двигунів

сФ - значення магнітного потоку визначається за навантажувальною характеристикою, яка зображена на рис. 4.4.

Аналогічний алгоритм розрахунок проводиться для всіх реостатних опорів позиція, змінюючи значення опорів відповідних кожної позиції. Електромеханічні характеристики при ослабленні поля на паралельному з'єднанні значень коефіцієнта β= 0.8, 0.5, 0.35 (рис.4.5.)

$$V_{оп} = \frac{U_{нс} - I \cdot R_{оп}}{F_{оп} = 3{,}6 \cdot I \cdot c\Phi(\beta \cdot I) \cdot \eta}$$

де $V_{оп}$ - швидкість при ослаблення магнітного поля;

$F_{оп}$ - сила тяги при ослаблення магнітного поля;

$R_{оп}$ - Сумарний опір, що припадає на одну ТМ під час послаблення магнітного поля:

$$R_{оп} = R_{я} + R_{д.п} + \beta \cdot R \qquad (4.15)$$

cФ(β·I) - Магнітний потік при струмі β· I

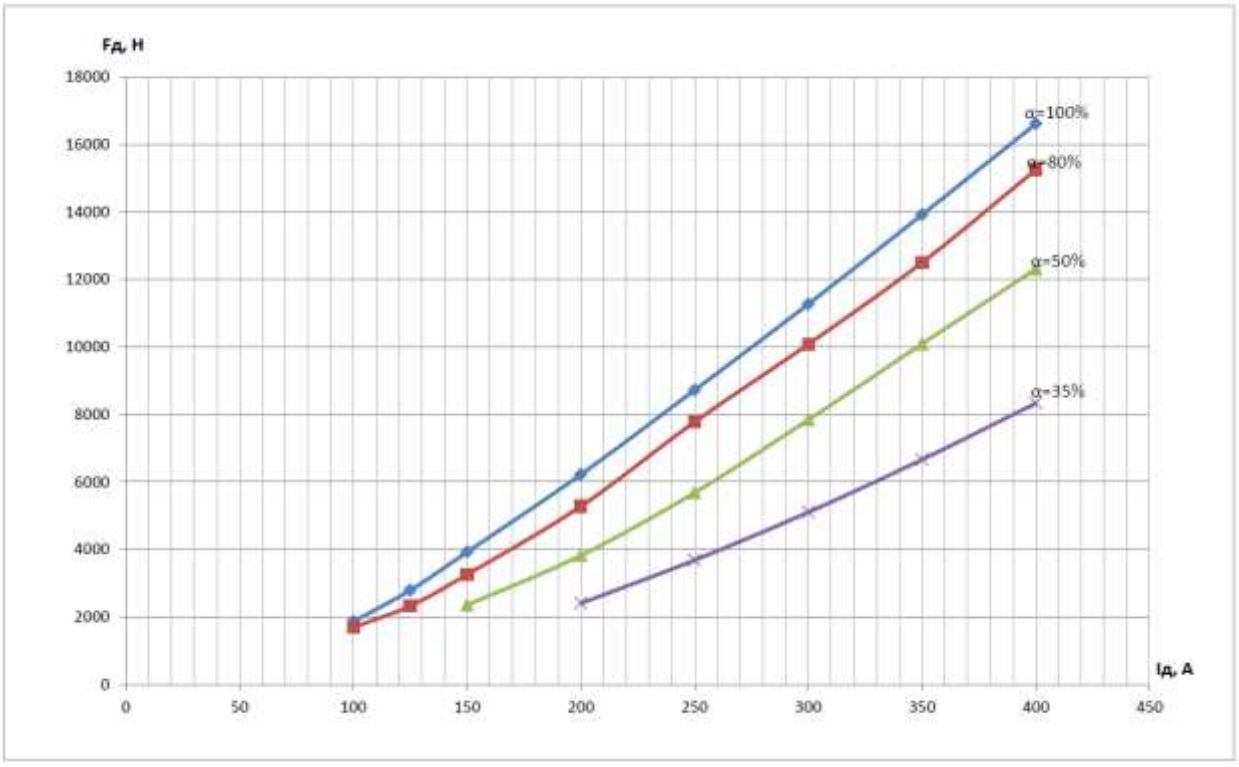


Рисунок 4.5. - Електромеханічні характеристики при ослаблення поля

Розрахунок та реостатні характеристики на паралельному з'єднанні представлені на рис. 4.6 та на рис. 4.7. представлена залежність швидкості руху від струму ТМ.

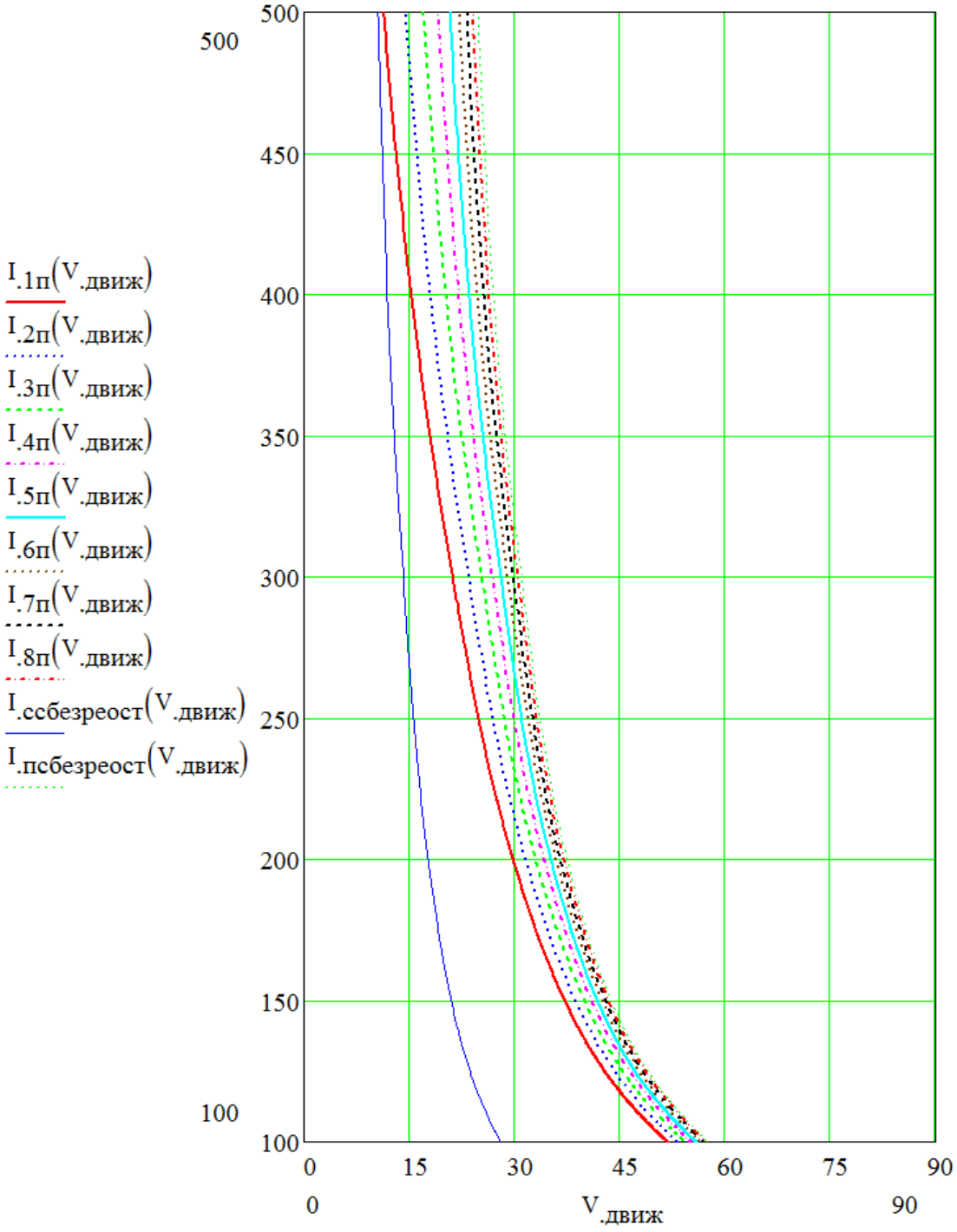


Рисунок 4.6. - Реостатні характеристики на паралельному з'єднанні

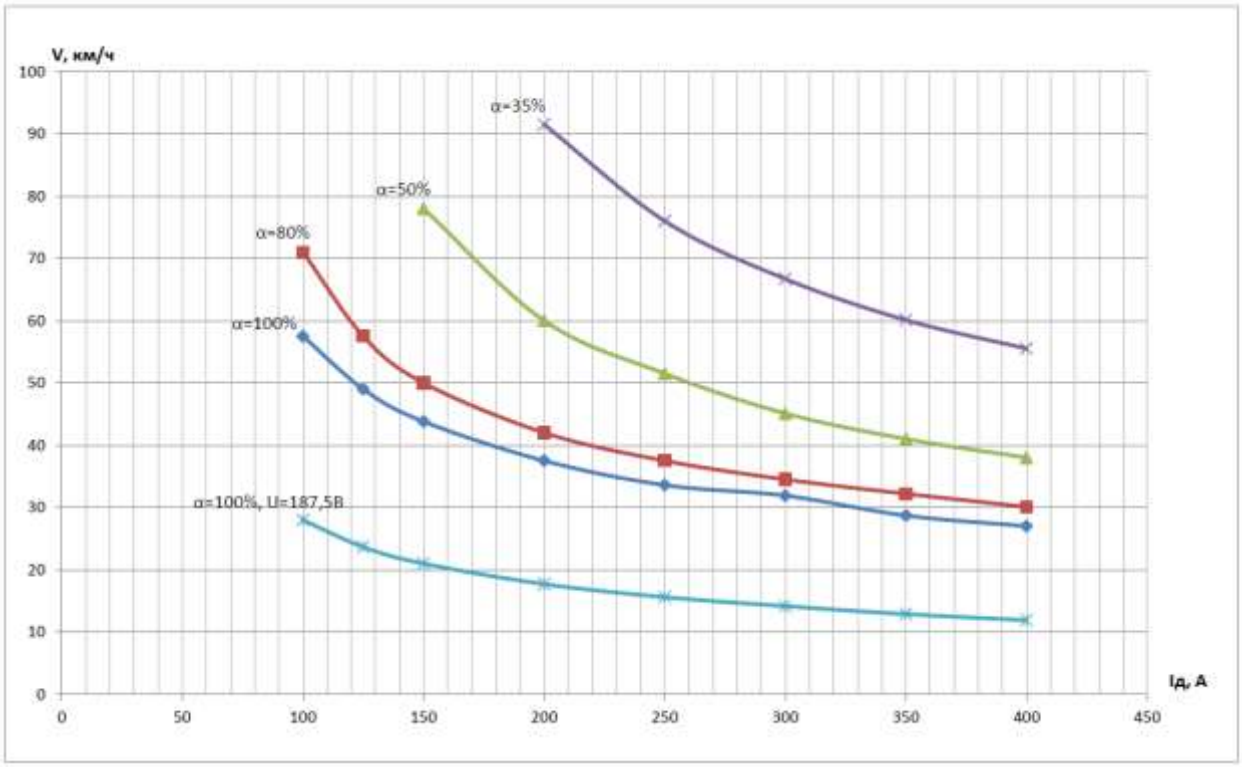


Рисунок 4.7. - Залежність швидкості руху від струму електродвигуна при ослаблення поля

. Визначення пускового струму. Режим пуску.

Середній пусковий струм розраховуємо по формулі:

де k_I - відносне значення пульсацій пускового струму; k_3 - коефіцієнт запасу.

Для вагонів метро $k_I = 0{,}05 \ldots 0{,}07$, $k_3 = 1{,}05$.

Під $I_{\text{п Макс}}$ розуміють менше значення струму, що визначається з умови максимально допустимого струму для даного двигуна I Макс та з умови зчеплення колеса з рейкою:

$$I_{\text{п Макс}} \le I_{\text{Макс}} ,$$

$$I_{\text{п Макс}} \le I_{\text{сц.}}$$

де $I_{\text{Макс}} = 2 \cdot I_{\text{год}}$ в відповідно з ГОСТ на тягові електродвигуни. Для двигуна ДК-117: $I_{\text{Макс}} = 2 \cdot 330 = 660$ А

Максимальний струм $I_{\text{сц}}$ визначається за $F_{\text{п Макс}}$ та електромеханічних характеристик для повного поля.

$$F_{\text{п Макс}} \leq 1000 \cdot G_{\text{п Макс}} \cdot \psi = 22410 \text{ Н}, \qquad (4.17)$$

Зчіпну вагу поїзда знаходимо як добуток маси поїзда з пасажирами (вважаємо, що вагони максимально заповнені, середня маса пасажира – 70 кг) на прискорення вільного падіння.

Приймаємо $I_{\text{п макс.}} = 400$ А. З електромеханічної характеристики (рис. 3.7) для повного поля знаходимо значення сили, відповідне цьому струму $F = 16610$ Н. Вибране значення струму $I_{\text{п Макс}}$ задовольняє обом умов.

Знаходимо середній пусковий струм:

$$I_{\text{п}} = \frac{400}{(1+0,06)\cdot 1,05} \approx 360\mathbf{A}$$

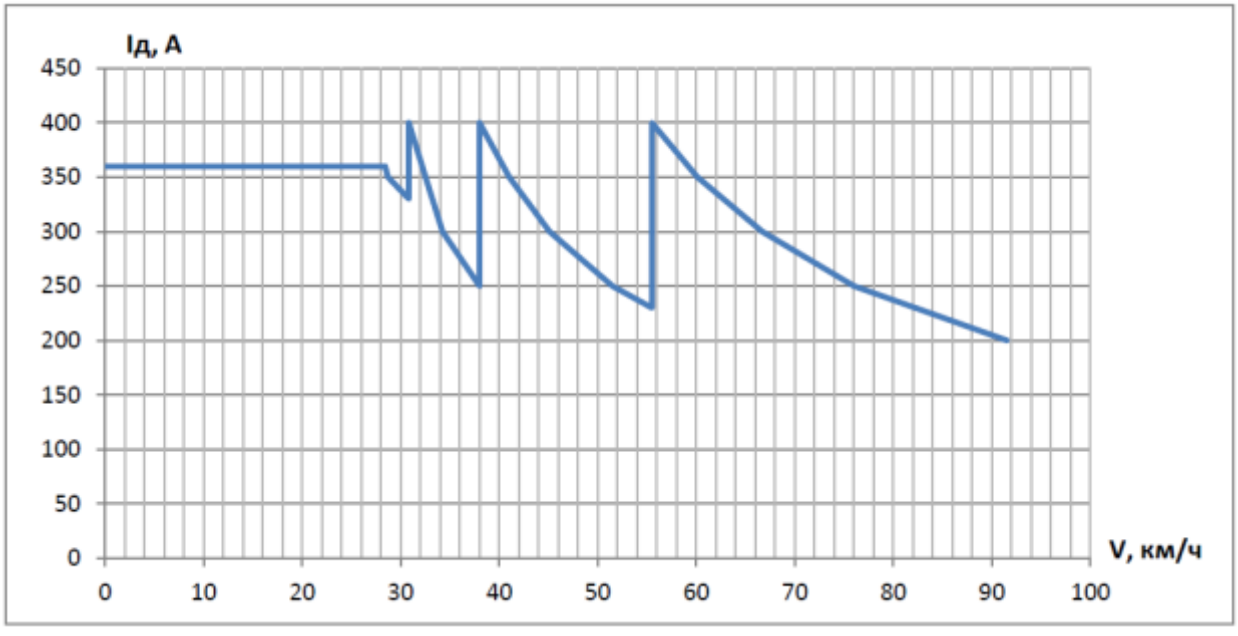


Рисунок 4.8. - Швидкісні характеристики

Режим пуску на електромеханічні характеристики двигуна наноситься з наступних положень. Пусковий струм, рівний $I_{\text{п}}$ та обмежений за умовою $I_{\text{Макс}}$,

аж до виходу на автоматичну характеристику повного поля залишається постійним. Далі відбувається перехід позиції ослабленого поля. Перехід з однієї позиції ослабленого поля на іншу відбувається таким чином, щоб стрибок струму при переході не перевершував $I_{\text{п Макс}}$. Швидкісні характеристики з нанесеними ними режимом пуску зображені на рис. 4.8.

. Розрахунок тягових характеристик і побудова кривий споживаного поїздом струму

Тягові характеристики поїзда $F_{\text{л}} = f\ (V)$ (рис. 4.9) будуються на підставі електромеханічних характеристик двигуна. Швидкість переноситься без зміни, а сила потягу визначається за формулою:

$$F_{\text{л}} = F_{\text{д}} \cdot Z_{\text{М}} \cdot n_{\text{в}} \qquad (4.18)$$

де $Z_{\text{М}} = 32$ – число обмоторених осей вагона, $n_{\text{в}} = 8$ – кількість вагонів.

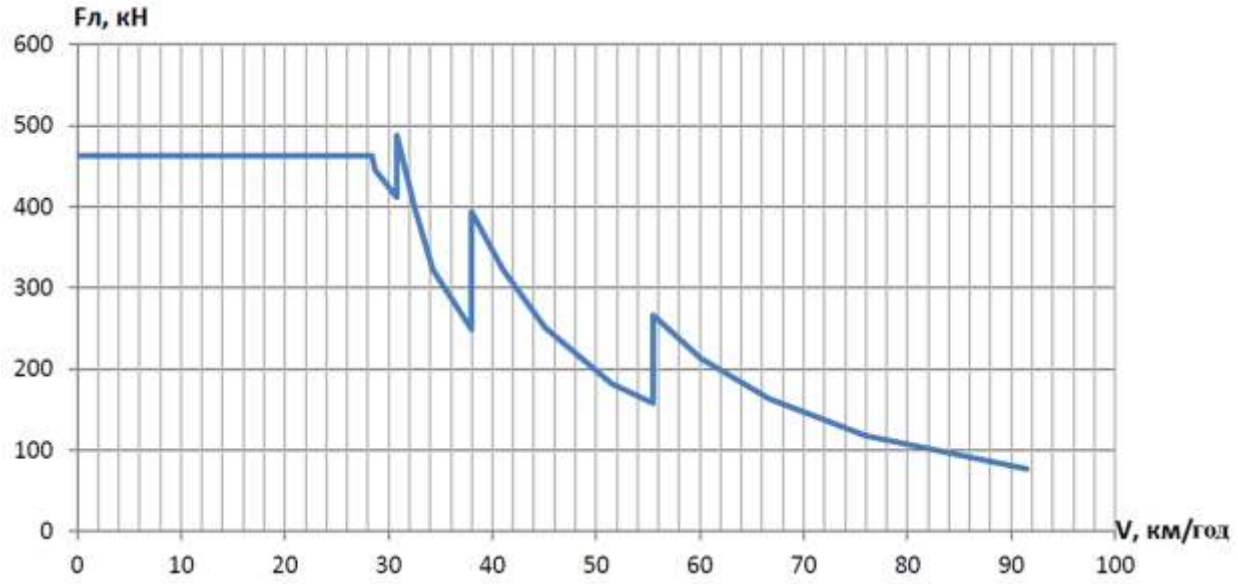


Рисунок 4.9. – Тягова характеристики поїзда $F_{\text{л}} = f\ (V)$

Режим пуску на тягові характеристики наноситься перенесенням режиму пуску електромеханічних характеристик.

Крива споживаного струму $I_{\text{л}} = \varphi(V)$ (Рис. 4.10) будується на підставі електромеханічних характеристик з урахуванням нанесеного режиму пуску:

де $Z_{П}$ - число паралельно з'єднаних двигунів одного моторного вагона.

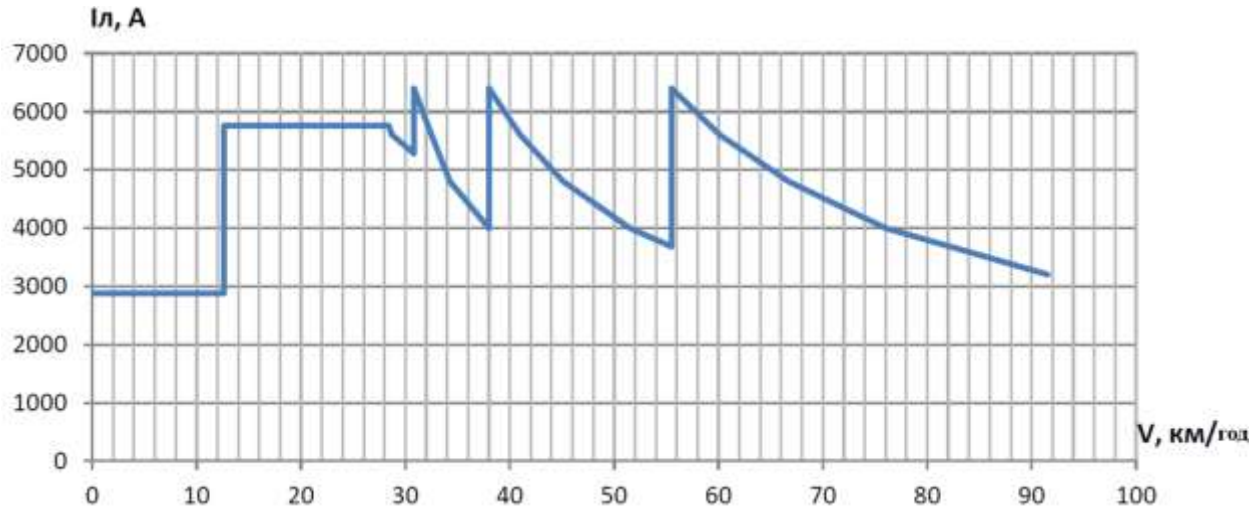


Рисунок 4.10. - Крива споживаного струму I л = $\varphi(V)$

При переході з послідовного з'єднання двигунів на паралельне величина струму поїзда подвоюється. Швидкість руху, при якій відбувається це зміна, визначається перетином кривий пускового струму і швидкісної характеристики, що відповідає напрузі на двигуні U_1 = 175 В і дорівнює 12,6 км/год.

. Розрахунок гальмівних характеристик

Гальмування ЕРС здійснюється у три етапи: спочатку рекуперативне гальмування до деякої швидкості, яка підлягає визначенню, потім реостатне, та електромеханічне гальмування до повної зупинки. При рекуперативному гальмуванні послідовна обмотка збудження підключається до незалежного джерела живлення (отримуємо ТМ із незалежним збудженням), т.к. ТМ послідовного порушення не може забезпечити рекуперацію енергії. Гальмування починається на паралельному з'єднанні ТМ.

Розрахунок характеристик питомих гальмівних сил при механічному гальмуванні $b(V)$ (Н/кН) здійснюється за виразом

$$b = 1000\varphi \text{ до } \theta \qquad (4.20)$$

де, значення розрахункового коефіцієнта тертя $\varphi_к$ визначається по виразу:

гальмівний коефіцієнт поїзди визначається:

де, $\sum K$ - сумарне натискання колодок

Найбільше сумарне натискання колодок $\sum K_{Макс}$ обмежено умовами зчеплення колеса і рейки і характеризується коефіцієнтом натискання гальмівних колодок:

$$\delta = \frac{\sum K_{макс}}{G_т}$$

Оскільки вагони метро – моторні та всі колеса мають механічні гальма, то $G = G_T$ і $\theta_{макс} = \delta$, тобто найбільший гальмівний коефіцієнт поїзда дорівнює коефіцієнту натискання (при екстреному гальмуванні).

Для вагонів метро $\theta_{Макс} = \delta = 0{,}55$. При робочому натисканні колодок гальмівний коефіцієнт приймається рівним 0,75. $\theta_{Макс} = 0{,}75 \cdot 0{,}55 = 0{,}4125$.

Таким чином, гальмівна сила при робочому і екстреному гальмуванні

$$b(V) = 1000 \cdot 0{,}36 \cdot \frac{V + 150}{2v + 150} \cdot 0{,}4125$$

Результати розрахунку наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5. Питома гальмівна сила метро при робочому та екстреному гальмуванні

V, км/год	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
b, Н/кН	148,5	139,8	132,9	127,3	122,7	118,8	115,5	112,7	110,2	108
be, Н/кН	198,0	186,4	177,2	169,7	163,6	158,4	154,0	150,2	146,9	144,0

$$\theta = \frac{\sum K}{G}$$

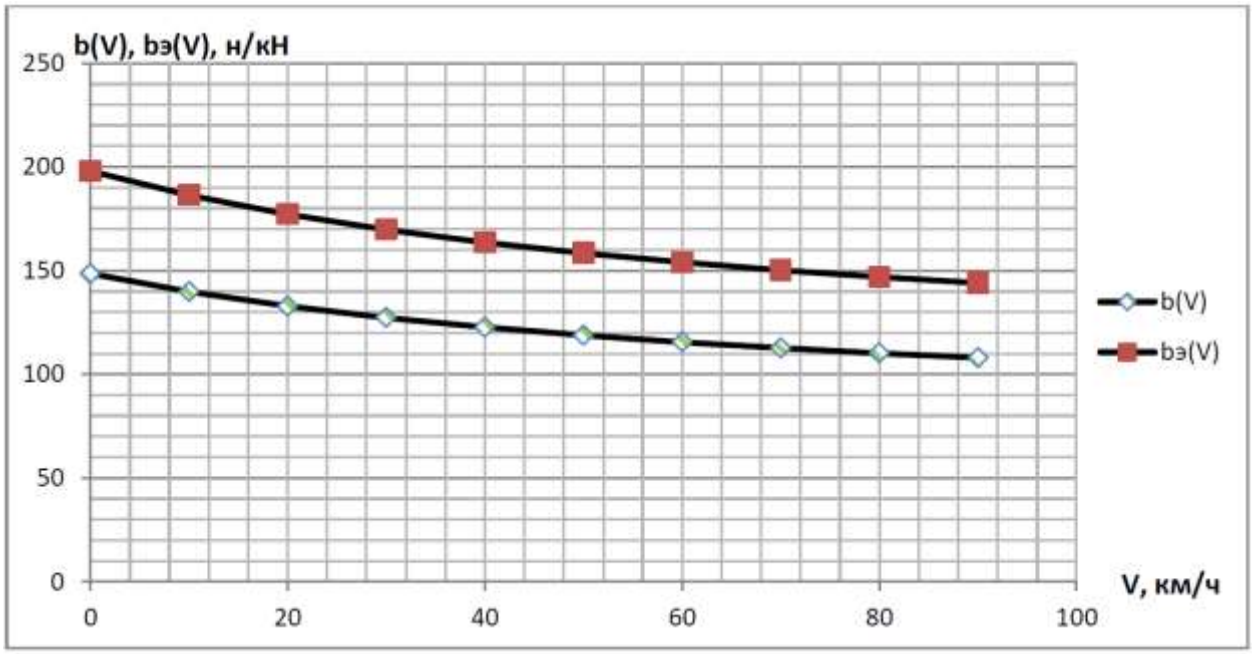


Рисунок 4.11. - Гальмівні характеристики при механічному гальмуванні

Питома чинна гальмівна сила при максимальному натисканні колодок

$$_{e} + w_{0бт} = \varphi(V) \qquad (4.26)$$

Результати розрахунку наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 - Питома гальмівна сила, що діє, при максимальному натисканні колодок

V, км/год	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
b_e, Н/Кн	198,0	186,4	177,2	169,7	163,6	158,4	154,0	150,2	146,9	144,0
$w_{0бт}$	1,91	2,22	2,64	3,18	3,84	4,62	5,51	6,51	7,64	8,88
$b_e + w_{0бт}$	199,91	188,57	179,8	172,9	167,41	163,02	159,51	156,72	154,54	152,88

. Визначення допустимою швидкості руху розрахунковим методом

Задаємо відрізки швидкості ΔV (не більше 10 км/год), на кожному відрізку ΔV_i визначаємо $(b_e+w_o(бТ))_{ср}$ а розрахунок проведеться наступними формулами:

$$\Delta I = \frac{7,87(1+\gamma)v_{ср}\Delta v}{(b+w_{0бт})_{ср}}$$

На діаграмі V = φ (l) (рис. 4.12) по осі обсцис в вибраному масштабі шляхи складають значення розрахункового гальмівного шляху $l_{рТ}$ і з точки О у зворотному порядку (від V=0) графічним методом будують криві гальмування V = φ(l) для значення ухилів: i = 0 .

Для обліку попереднього шляху достатньо для будь-якої швидкості V відкласти від осі ординат відрізок $l_П = V \cdot t_П /3,6$ і з'єднати його з точкою О. Ординати точок перетину цієї прямої та кривих V = φ(l) визначають найбільші швидкості, допустимі на відповідних ділянках шляху.

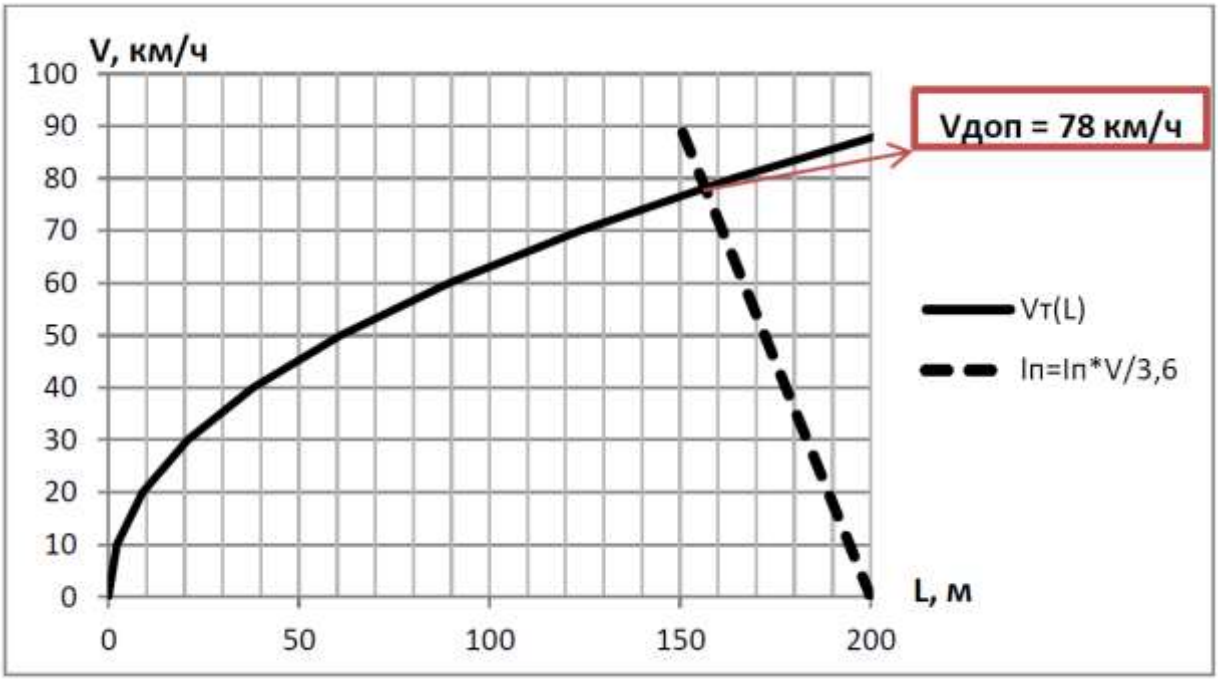


Рисунок 4.12. - Визначення допустимою швидкості руху

. Побудова характеристик питомих діючих сил

Характеристика сил, що діють на потяг у режимі тяги, будується шляхом віднімання при однієї і тій ж швидкості ординат кривий основного питомої

опору при русі під струмом з ординат питомої тягової характеристики, що розраховується за рівнянням:

$$f_л = \frac{F_л}{G}$$
$$f = f_л - w_o(T) \qquad (4.28)$$

Характеристика сил, що діють на поїзд у режимі гальмування, будується шляхом додавання при однієї і тій ж швидкості ординат кривих основного питомої опору при русі без струму та b(V) у разі механічного гальмування. b(V) визначається при робочому натисканні колодок.

$$_т = b + w_o (бТ) \qquad (4.29)$$

Результати розрахунку наведено в табл. П.17

Характеристика сил, діючих на поїзд в режимі вибігу:

f

Результати розрахунку наведено в табл. П.18 в

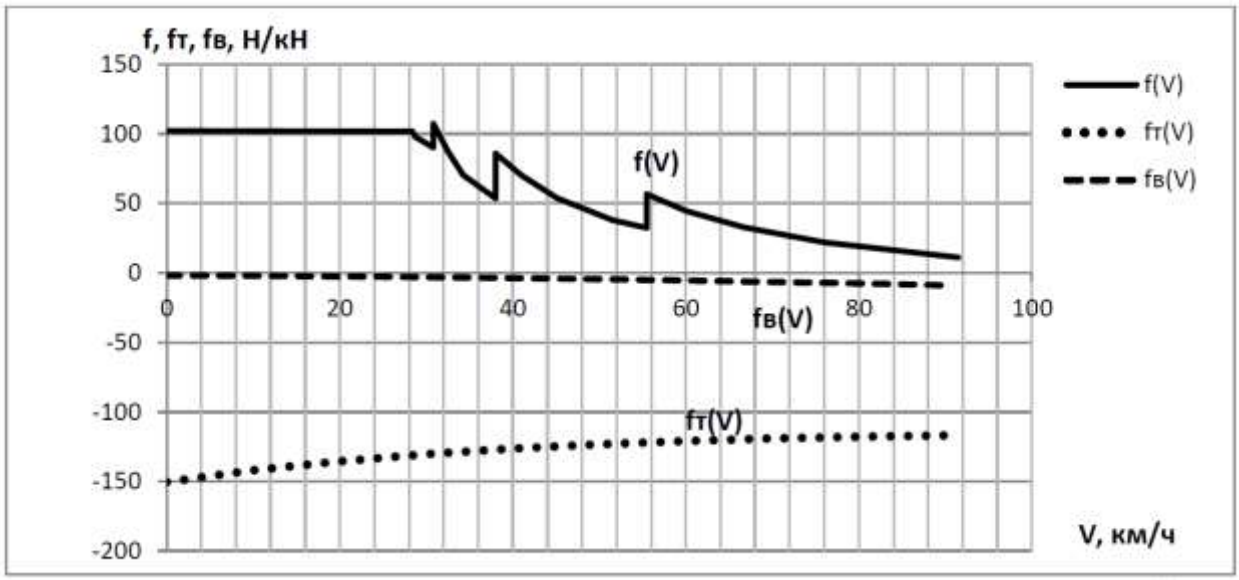


Рисунок 4.13. - Залежність діючих сил на поїзд в режимах тяги, гальмування та вибігу від швидкості руху

Визначення витрати енергії на рух поїзди

Витрата електричної енергії може бути визначена за кривими руху або шляхом розрахунку окремих складових за аналітичними виразами.

за кривим руху витрата енергії визначають по виразу:

Звідси,

$$A = \frac{1}{\eta_{тс}\eta_{п/ст}}\left\{\frac{U_{кс}}{3600}\left[\left(\sum I_{л.ср}\Delta t\right)_{тяг} - \left(\sum I_{л.ср}\Delta t\right)_{рек}\right] + \frac{P_{сн}}{3600}(T_{пер} + T_{ост})\right\}$$

де, по [8]: $\eta_{тс} = 0{,}93$ - середній ККД тягової мережі;

$\eta_{п/ст} = 0{,}95$ - середній ККД тяговий підстанції;

$P_{сн} = 3$ кВт - потужність навантаження власних потреб;

$T_{пер}$ - час руху поїзда по перегону;

$T_{ост} = 25$ з - час зупинки для метрополітену;

$_{кс}$ =750 В - Середнє напруга в контактної мережі.

Таблиця 4.7 – Добуток $I_{лі} \cdot t_i$ для розрахунку витрати енергії руху

п/п	Δt, с	t, с	$I_{л.ср}$, А	$I_{л.ср}\Delta t$, А×с	$I^2 \cdot \Delta t$, $А^2 \times с_{л.ср}$
1	3,72	3,72	2880	10711	30846874
2	2,19	5,91	5760	12597	72559411
3	2,51	8,41	5760	14440	83176243
4	0,09	8,50	5680	517	2935878
5	0,67	9,18	5440	3661	19916493
6	0,53	9,70	6000	3156	18936000
7	2,52	12,22	4400	11088	48787200
8	1,16	13,38	6000	6960	41760000
9	2,00	15,38	5200	10390	54025920
10	4,21	19,59	4400	18524	81505600
11	3,43	23,02	3840	13175	50592154
12	2,75	25,77	6000	16482	98892000
13	5,16	30,93	5200	26837	139553440
14	10,28	41,21	4400	45219	198962720
15	4,35	45,56	3904	16982	66299290
$\sum I_{л.ср}\Delta t$				210739	
$\sum I^2 \cdot \Delta t.ср T_{уч}$					1008749222

Тоді :

$$A = \frac{1}{0{,}93 \cdot 0{,}95}\left[\frac{750}{3600} \cdot 210739 + \frac{3 \cdot 10^3}{3600}(105{,}83 + 25)\right] = 49819 \text{ Вт·год} \quad (4.37)$$

Питома витрата енергії на рух по горизонтальному профілю:

$$A_{\text{пит}} = \frac{U_{\text{кс}} \int_0^T Idt}{\eta_{\text{п/ст}} \eta_{\text{тс}} \cdot m \cdot L} \qquad (4.37)$$

$$A_{\text{пит1}} = \frac{A}{m \cdot L \cdot 10^{-3}} = \frac{49817}{456{,}8 \cdot 1700 \cdot 10^{-3}} = 64{,}16 \frac{\textbf{Вт} \cdot \textbf{год}}{\textbf{т} \cdot \textbf{км}}$$

Визначення витрати енергії на рух поїзди аналітичним методом

При аналітичному методі витрата енергії визначається окремих складових:

$$A = \frac{1}{\eta_{\text{п/ст}} \eta_{\text{тс}}} \left(\frac{A_w + A_i + A_T}{\eta_{\text{м}}} + A_{\text{П}} + A_{\text{сн}} \right) + A_{\text{п/ст.кс}} \qquad (4.38)$$

де: A_w - Витрата енергії на подолання основного опору руху; A_i - Витрата енергії на подолання ухилів; A_T Витрата енергії на гальмування до зупинки; потреби; $A_{\text{П}}$ - Витрата енергії на пуск; $A_{\text{п/ст.кс}}$ – витрата енергії на тягові підстанції та контактну мережу.

Витрата енергії на подолання основного опору руху:

де: $w_{0\text{ср}}$ = 5,9 Н/кН – середнє значення основного опору руху визначається за кривою $w_0 = f(v)$ для руху без струму для швидкості:

$$1{,}1 V_{ср} = \frac{1{,}1 \cdot L}{T} = 1{,}1 \frac{1700 \cdot 3{,}6}{105{,}83} = 64 \text{ км/год}$$

$G \cdot w_{0\text{ср.}} \cdot L = 0{,}278 \cdot 10^{-3} \cdot 4481{,}2 \cdot 5{,}9 \cdot 1700 = 12495$ Вт·год

Витрата енергії на гальмування (без рекуперативного гальмування):

Витрата енергії визначається кінетичної енергією поїзди в момент початку гальмування за формулою:

$$A_T = \frac{m V_{\text{т}}^2}{2 \cdot 3{,}6^2} - G(w_{0\text{ср}} + i_{\text{т}}) I_{\text{т}} \qquad (4.42)$$

де: V_T - швидкість поїзди в момент початку гальмування;

m = – наведена маса поїзда; i = 0

$$A_{\text{т}} = \frac{0{,}278 \cdot 10^{-3} G V_{\text{т}}^2}{2 \cdot 3{,}6^2} \left[\frac{1000(1+\gamma)}{9{,}81} - \frac{w_{0\text{ср}} + i_{\text{т}}}{a_{\text{т}}} \right]$$

$_{\text{Т}}$ = 24220 Вт·год

Витрата енергії в пускових пристроях:

Кп = 0,5 - коефіцієнт пуску для вагона метро з чотирма двигунами.

При пуску корисна робота ТЕД витратиться на створення кінетичної енергії та подолання шляху.

$$A_{\text{п}} = \frac{0,278 \cdot 10^{-3} K_{\text{п}} G V_{\text{п}}^{2}}{2 \cdot 3,6^{2}} \left[\frac{1000(1+\gamma)}{9,81} - \frac{w_{0\text{ср}} + i_{\text{п}}}{a_{\text{п}}} \right] \qquad (4.44)$$

$_{\text{п}}$ = 2226 Вт·год

Витрата енергії на власні потреби:

$$A_{\text{сн}} = \frac{P_{\text{сн}} \cdot 10^{-3}}{3600} \left(T_{\text{х}} + T_{\text{ост}} \right) = \frac{3 \cdot 10^{3}}{3600} (105,83 + 25) = 109 \,\text{Вт·год} \qquad (4.45)$$

Сумарний витрата енергії (без рекуперативного гальмування):

Сумарна витрата енергії при русі метрополітену з урахуванням витрати енергії на ККД ТЕД ($\eta_{\text{ТЕД}}$ = 0,89) та на електричні тягові станції, підстанції ($\eta_{\text{п/ст}}$ = 0,95), тягові мережі ($\eta_{\text{кс}}$ = 0,93) дорівнюватимуть:

$$A_{\text{сум}} = \frac{1}{\eta_{\text{п/ст}} \eta_{\text{кс}}} \left(\frac{A_w + A_i + A_T}{\eta_{\text{ср.ТЕД}}} + A_{П} + A_{\text{сн}} \right) \qquad (4.46)$$

Питома витрата енергії (без рекуперативного гальмування):

$$A_{\text{пит}} = \frac{A_{\text{сум}}}{m \cdot L \cdot 10^{-3}} = \frac{49335}{456,8 \cdot 1700 \cdot 10^{-3}} = 63,53 \;\; \frac{Вт \cdot год}{т \cdot км}. \qquad (4.47)$$

Перевірка похибки між аналітичним методом і графічним методом розрахунку витрати енергії:

$$\delta = \frac{\left| A_{\text{пит2}} - A_{\text{пит1}} \right|}{A_{\text{пит1}}} \cdot 100\% = \frac{\left| 63,53 - 64,16 \right|}{64,16} \cdot 100\% = 1,1\%$$

Похибка δ менше 10%, то розрахунок сходиться.

5. Визначення економічного ефекту від застосування тягових перетворювачів у системі керування вагонів метрополітену

5.1 Коротка характеристика запропонованого рішення

Модернізація системи живлення тягових двигунів електропоїзда, а саме запровадження живлення від напівпровідникового перетворювача, дає можливість реалізовувати на даному рухомому складі більш надійну систему електроприводу. Це надає нам можливість суттєвого поліпшення умови роботи електрообладнання та скорочення витрат на поточне утримання систем електроприводу, шляхом впровадження напівпровідникових перетворювачів.

Запровадження напівпровідникової техніки вагонів метрополітену обумовлюється її техніко-економічними перевагами. Експлуатація напівпровідникової техніки дозволяє виконувати ремонт блоків за короткий термін часу, швидко замінювати непрацюючий блок на новий. Запропонований напівпровідниковий перетворювач зібраний з застосуванням високоякісної елементної бази зарубіжного виробництва, що зумовлює підвищення рівня надійності та ремонтопридатності рухомого складу, також один напівпровідниковий перетворювач замінює реостатну систему.

5.2 Розрахунок економічного ефекту

Економічний ефект заходу НТП визначається за весь розрахунковий період, включаючи розробку, виробництво і використання нової техніки, тобто є інтегральним ефектом.

Він розраховується, виходячи з умов використання тієї продукції (кінцевої продукції), яку планується виробляти з застосуванням нових

науково-технічних розробок. Під умовами використання мають на увазі обсяг випуску кінцевої продукції на протязі розрахункового періоду із застосуванням нових технічних засобів, матеріалів, технологій і попередньої ціни на неї.

Сумарний по рокам розрахункового періоду економічний ефект ($E_т$) визначається як перевищення сумарної вартісної оцінки результатів заходу НТП за розрахунковий період ($P_т$) над вартісною оцінкою сукупних витрат на здійснення заходу НТП за розрахунковий період ($З_т$) згідно з методичними вказівками [15]

$$E_т = P_т - З_т , \qquad (5.1)$$

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

$$\alpha_t = (1 + E_н)^{tр-t} , \qquad (5.2)$$

де $E_н$ – норматив приведення різночасових витрат і результатів, $E_н = 0{,}1$;

$t_р$ – розрахунковий рік;

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

Оскільки автоматичне вимкнення двигунів не вплине на вартісну оцінку результатів, тому економічний ефект буде визначатися економією витрат.

$$E_т = З_т^{б} - З_т^{н} , \qquad (5.3)$$

Вартісна оцінка витрат визначається

$$З_t = \sum_{t=t_н}^{t_к} З_t \cdot \alpha_t = \sum_{t=t_н}^{t_к} (u_t + k_t - л_t) \cdot \alpha_t \,, \qquad (5.4)$$

де $З_t$ - витрати всіх ресурсів у рік t (включаючи витрати на отримання супутніх результатів);

u_t - поточні витрати у рік t без урахування амортизаційних відрахувань на реновацію;

k_t - одноразові витрати у рік t;

$л_t$ - залишкова вартість (ліквідаційне сальдо) основних фондів, що вибувають у рік t.

До капітальних вкладень на модернізацію одного електропоїзда постійного струму входять витрати, пов’язані з придбанням перетворювачів, витрати на демонтаж старого обладнання і монтаж нового. Вартість напівпровідникового перетворювача складає 250000 грн. Для модернізації необхідно два напівпровідникових перетворювача, тому загальна їх вартість – 500000 грн.

Розглянемо витрати підприємства на оплату праці працівників та відрахування на соціальні заходи, що пов'язані з демонтажем старого обладнання, монтажем нового та встановленням напівпровідникового перетворювача. Трудові витрати на демонтаж старого обладнання представленні в таблиці 5.1.

На монтаж нового та встановлення напівпровідникового перетворювача представлені в таблиці 5.2, де розрахована основна і додаткова заробітна плата слюсарів третього і п'ятого розрядів по видам виконаних робіт, а також загальна сума трудових витрат.

Таблиця 5.1 – Трудові витрати на демонтаж тягового некерованого перетворювача

Вид робіт	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	Відрахування на соц.заходи, грн. (22%)	Усього, грн.
Демонтаж тягового некерованого перетворювача	3	1,28	37,9	48,51	4,85	10,67	64,03
	5	1,28	46,87	59,99	5,99	13,19	79,19
Усього, грн.							143,22

Оскільки на електропоїзді потрібно встановити два напівпровідникових перетворювачі, то витрати складуть, грн.

$$B_{МОНТ} = З_М \cdot m,$$

де m - кількість напівпровідникових перетворювачів у електропоїзді;

$З_М$ - витрати на монтаж перетворювача.

Таблиця 5.2 – Трудові витрати на монтаж та встановлення тягового перетворювача

Вид робіт	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна пла-та, грн. (10%)	Відрахування на соц.заходи, грн. (22%)	Усього, грн.
Монтаж тягового перетворювача	3	1,72	37,9	65,188	6,5188	14,34	86,05
	5	1,72	46,87	80,6164	8,06164	17,73	106,41
Усього, грн.							192,46

Підставляємо значення та отримаємо:

$$B_{МОНТ} = 192,46 \cdot 2 = 384,92 \; грн.$$

Трудові витрати на демонтаж складають

$$B_{ДЕМОНТ} = З_{Д} \cdot m_{м},$$

де $m_{м}$ - кількість електромашинних перетворювачів у електропоїзді;

$З_{Д}$ - витрати на демонтаж одного перетворювача.

Підставляємо значення та отримаємо:

$$B_{ДЕМОНТ} = 143,22 \cdot 4 = 572,88 \; грн.$$

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

$$\Delta K = \Sigma B_{ПР} + B_{МОНТ} + B_{ДЕМОНТ},$$

де $B_{МОНТ}$ - монтаж обладнання, грн.;

$B_{ДЕМОНТ}$ - витрати на демонтаж обладнання, грн.

$$\Delta K = 500000 + 384{,}92 + 572{,}88 = \ 500957{,}83 \text{ грн.}$$

У даному розділі розрахунок економічного ефекту базується на отриманні прибутку від нововведення за рахунок економії електричної енергії на тягу поїздів та витрат на обслуговування та ремонт електропоїзда.

Розраховуємо витрати електроенергії на тягу поїздів одного електропоїзда базового варіанту і нового варіанту.

Визначимо пробіг електропоїзда за рік

$$\mathrm{L_{рік}} = 365 \times \mathrm{L_c}, \qquad (5.8)$$

де $\mathrm{L_c}$ - пробіг середньодобовий електропоїзда, км.

$$\mathrm{L_{рік}} = 365 \times 388 = 141620 км.$$

Середньорічний бюджет часу електропоїзду

$$K_{об} = 365 \cdot 24 - (\sum T_{ТР1} + \sum T_{ТР2} + \sum T_{ТР3} + \sum T_{то3}) \ , \qquad (5.9)$$

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

$\sum T_{то3}$ - простій електропоїзду на технічному обслуговуванні ТО3 в середньому за рік, год.

Простій на і-виді ремонту за рік

$$\sum T_i = \sum M_i \cdot \mathrm{t}_{\text{рем}_i} \ , \tag{5.10}$$

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

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

Кількість ремонтів і-го виду за рік

$$\sum M_i = \frac{L_{річ}}{n_{рем_i}} \ , \tag{5.11}$$

де $n_{рем_i}$ - міжремонтний пробіг і-го виду ремонту;

$$\sum M_{тр3} = \frac{141620}{260000} = 0{,}544,$$

$$\sum M_{тр2} = \frac{141620}{120000} = 1{,}18,$$

$$\sum M_{тр1} = \frac{141620}{388 \cdot 50} = 7{,}3,$$

де 50 – міжремонтний період ПР1, діб.

$$\sum M_{то3} = \frac{141620}{388 \cdot 5} = 73,$$

де 5 – міжремонтний період ТО3, діб.

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

$$\sum T_{тр3} = 0{,}544 \cdot 91 = 49{,}504 \text{ год},$$

$$\sum T_{тр2} = 1{,}18 \cdot 36 = 42{,}48 \text{ год},$$

$$\sum T_{тр1} = 7{,}3 \cdot 15 = 109{,}5 \text{ год},$$

$$\sum T_{то3} = 73 \cdot 6 = 438 \text{ год}.$$

Ефективний фонд робочого часу електропоїзда за рік

$$T_{еф} = 365 \cdot 24 - (49{,}5 + 42{,}5 + 109{,}5 + 438) = 8120{,}5 \text{год}.$$

Визначаємо річну кількість електричної енергії спожитої на власні потреби з середньою потужністю навантаження 40 кВт на одну секцію. Потужність на весь електропоїзд складе $P_{нав}$ = 40·4=160 кВт для базового варіанту, кВт-год

$$E_{\text{річ}}^{баз} = \frac{P_{нав}}{\eta_{Дк}} \times T_{еф} = \frac{160}{0{,}712} \times 8120{,}5 = 1824719{,}10 \text{кВт - год},$$

для модернізованого варіанту, кВт-год

$$E_{\text{річ}}^{мод} = \frac{P_{нав}}{\eta_{н.пер}} \times T_{еф} = \frac{160}{0{,}95} \times 8120{,}5 = 1367578{,}95 \text{кВт - год},$$

де $\eta_{н.пер}, \eta_{ДК}$ - коефіцієнт корисної дії напівпровідникового перетворювача власних потреб та машинного перетворювача відповідно.

Визначаємо економію електричної енергії

$$\Delta E_{\text{річ}} = \left(E_{\text{річ}}^{баз} - E_{\text{річ}}^{мод}\right) \cdot к_{сз} \cdot в_{е} = (1824719{,}1 - 1367578{,}95) \cdot 0{,}26 \cdot 10{,}3 = 1035443 \text{ грн}.$$

$к_{сз}$ – коефіцієнт середньорічного завантаження допоміжного електрообладнання; 1035443

$в_е$ - вартість електричної енергії 10,3 грн/кВт-год;

Визначаємо економію витрат на ремонт таблиця 5.4.

Таким чином річна економія поточних витрат на ремонт перетворювачів власних потреб складає

$$\Delta E_{\text{річ}}^{рем} = 5939{,}5 - 654{,}85 = 5284{,}68 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.4 – Визначення загальної вартості ремонту перетворювача

Вид ремонту	Кількість ремонтів	Вартість ремонту перетворювачів, грн	Кількість перетворювачів на електропоїзді, шт	Вартість ремонту обладнання електропоїзда, грн
Вартість ремонту машинного перетворювача власних потреб				
ПР3	0,544	300,56	4	654,01
ПР2	1,18	70,72	4	333,79
ПР1	7,3	29,58	4	863,73
ТО3	73	14	4	4088
Разом				5939,553
Вартість ремонту напівпровідникового перетворювача власних потреб				
ПР3	0,544	100,26	2	109,08288
ПР2	1,18	54,2	2	127,912
ПР1	7,3	28,62	2	417,852
ТО3	73	0	2	0
Разом				654,85
Різниця вартості ремонту				5284,68

Загальна економія витрат складе

$$\Delta E_{\text{річ}}^{заг} = 1035443 + 5284{,}68 = 1040727{,}68 \text{ грн.}$$

Розрахунок економічного ефекту здійснюється у табличній формі.

Таблиця 5.5 - Розрахунок економічного ефекту за роками експлуатації

Показник	Розрахунковий період (роки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Капітальні вкладення K_t, тис.грн.	500,96									
Економія поточних витрат Δu_t, тис. грн	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44
Економічний ефект E_t, тис.грн.	534,483	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44
Коефіцієнт приведення α_t	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62	0,56	0,51	0,47	0,42
Економічний ефект з урахуванням приведення $E_t \cdot \alpha_t$	534,483	942,25	859,41	776,58	704,1	641,97	579,84	528,07	486,65	434,88
Економічний ефект наростаючим підсумком $E_1 + E_2 + \ldots + E_k$ тис.грн.	534,483	1476,73	2336,15	3112,73	3816,83	4458,81	5038,66	5566,73	6053,39	6488,28

Висновок: розрахунок економічного ефекту від впровадження напівпровідникового перетворювача на електропоїзді постійного струму вказує на доцільність запропонованого заходу, а значення економічного ефекту за десять років наростаючим підсумком складає 6488280 грн., період повернення капітальних вкладень на перший рік.

Висновок

В магістерській роботі проаналізовані різні типи ТЕП, які краще використовувати на ЕРС. У кожній системі ТЕП є свої плюси та мінуси. По аналітичному огляду показує, що доцільність застосування ЕРС тієї чи іншої типу ТЕП визначається експлуатаційними вимогами. Виконано порівняльний аналіз переваг та недоліків систем ТЕП вагонів метро з різними видами тягових двигунів та в результаті виявлено такі висновки:

показано, що при використанні на моторних вагонах ТІУ поступається ДРУ за багатьма показниками (тягові та гальмівні властивості, псування енергії, ефективність рекуперації тощо) та заміна ДРУ на ТІУ призводить до подорожчання та збільшення маси електроустаткування та не підвищує його надійність.

показано, що для створення надійного безколекторного ТЕП стосовно умов роботи ЕРС потрібно провести великий обсяг дослідницьких і конструкторських робіт, пов'язаних з розробкою вузлів і макетуванням перетворювача. Крім цього, для впровадження ЕРС із АТМ необхідність створення спеціалізованою ремонтної бази, витрати на яку у кілька разів перевищують витрати на експлуатацію електроустаткування серійних реостатних вагонів.

наведено порівняння надійності приводів, що ґрунтується на статистиці експлуатації та показано, що привід на підставі АТМ не матиме переваг по надійності, тому запропоновано модернізувати силову схему керування двигуном. постійного струму заміною контакторного обладнання безконтактним. Це вимагає набагато менших капіталовкладень, але при цьому з'являється можливість оснащення поїздів хоч і складною, але ефективною системою контролю, діагностики та захисту електричних ланцюгів, що суттєво підвищує надійність та ремонтопридатність ЕРС.

встановлено, що в тязі середніх потужностей та середніх швидкостей (у тому числі для метропоїздів) привід змінного струму не є обов'язковим. Оцінка

ефективності ТМ за значеннями їх ККД на номінальних режимах роботи показала, що при потужності приводу до 300 кВт, ТМ ПТ ефективніше за АТМ, оскільки має більш високі значення ККД.

показано, що резерви покращення техніко-економічних показників ЕРС із колекторними тяговими машинами постійного струму (КТМ) далеко ще не вичерпані і за їх використанні застосування ЕРС з ТМ ПТ економічно доцільніше.

ЕРС з КТМ можуть бути суттєво покращені при заміні послідовного збудження ТМ незалежним та при оснащенні нею силовою електронікою [10]. Це технічне рішення не вимагає великих витрат і може бути реалізовано при модернізації парку, що експлуатується. Показано, що основний недолік сьогоднішньої тяги постійного струму над колекторних ТМ, а контакторному управлінні їх роботою. Воно суттєво знижує конкурентоспроможність тяги постійного струму. Можливість досягнення помітних експлуатаційних переваг у ТМ ПТ пов'язана з використанням безконтактних елементів у силових ланцюгах ТЕП, що дозволяє спростити схему силової кабельної розведення та виключити практично всю контакторну апаратуру, в результаті більше половини ушкоджень можна повністю виключити із практики експлуатації електропоїздів. Ще більш вагомими техніко-економічними перевагами повинні мати нові вагони, якщо ставити питання про заміну ними ЕРС, що ними експлуатується, не виробив розрахункового ресурсу. Такий захід, вимагаючи великих матеріальних та трудових витрат, не може бути економічно ефективною при використання всіх розглянутих напрямів удосконалення ТЕП, включаючи збільшення потужності ТМ, реалізоване на метрагонах. Отже, в експлуатації ще довго будуть знаходитися вагони старих типів, що не виробили свій ресурс. Сьогодні назріла необхідність модернізації вагонів, що експлуатуються, яку, природно, слід здійснювати з максимальним використанням наявного електрообладнання. Найбільшою мірою цій вимогі задовольняє застосування на вагонах системи ТЕП із незалежного збудження тягових машин.

Список використаних джерел

айт https://www.google.com/search?client=firefox-b-

еорія електричної тяги: підручник: у 2 т. / Г. К. Гетьман; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2015. – 492 с.
айт https://document/253044634/Bombardier-Transportation-EPD-MITRAC-TC-

татичні перетворювачі тягового рухомого складу: Навч. посібник / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко та ін./ За ред. Ю. П. Гончарова – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. - 192с.
илові напівпровідникові перетворювачі енергії : навч. посібник / О. О. Шавьолкін; Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 403 с.
енько В. І., Панасенко М. В., Юрченко М. М. та ін.. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник у 4-х томах / За ред. В. І. Сенька. Т.1. Елементна база електронних пристроїв. – К.: Обереги, 2000. – 300 с.
ememенко О.І., Семененко Ю.О. Методичні вказівки до курсового проекту з дисципліни Тягові статичні перетворювачі на тему “Модернізація тягового електроприводу ЕРС з асинхронними двигунами”. Харків: УкрДУЗТ, 2017 – 24 с.
ончаров Ю.П., Будьонний О.В., Морозов В.Т., Панасенко М.В., Ромашко В.Я., Руденко В.С. Перетворювальна техніка: Підручник/ За ред. В.С. Руденка.– Харків: Фоліо, 2000. Ч.2. – 360 с.
алабухін Ю.Є., Шраменко О.В. Методичні вказівки до дипломного проектування для студентів спеціальності “Електричний транспорт” всіх форм навчання «Визначення економічної ефективності заходів науково-технічного прогресу на залізничному транспорті». Харків: УкрДУЗТ, 2007 – 20 с.
усаловський А. В. Правові та організаційні питання охорони праці: навч. посіб.

/ А. В. Русаловський – 4-те вид., допов. і переробл. – К.: Університет «Україна», 2009. – 295 с.
овий російсько-український словник-довідник: 100000 термінів / за ред. С. Я. Єрмоленко. – 2-ге вид., допов. – К. : Довіра: Рідна мова, 1999. – 877 с.

Додаток А

Український державний університет залізничного транспорту

Механіко-енергетичний факультет

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ІЛЮСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ

Український державний університет залізничного транспорту

Механіко-енергетичний факультет

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Ілюстраційний матеріал до кваліфікаційної роботи на тему

«ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОЇЗДІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ»

Розробив: студент групи 214-ЕЕ-Д24 спеціальності 273

освітньої програми «Електровози та електропоїзди»

Шевченко Сергій Олександрович

Схема силових ланцюгів вагонів метрополітену 81-717/714

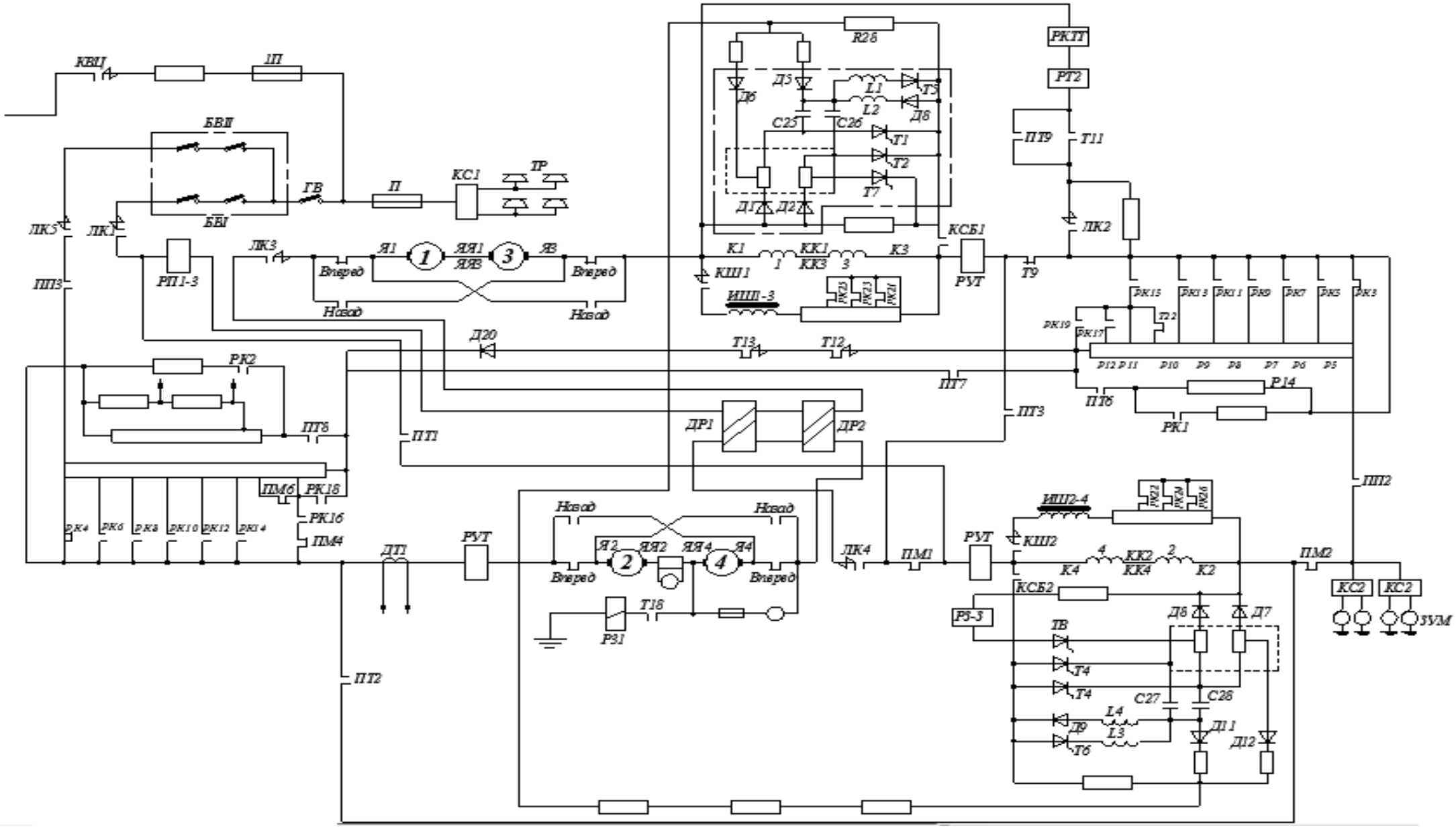


Схема силових ланцюгів комплекту електроустаткування з асинхронними тяговими машинами

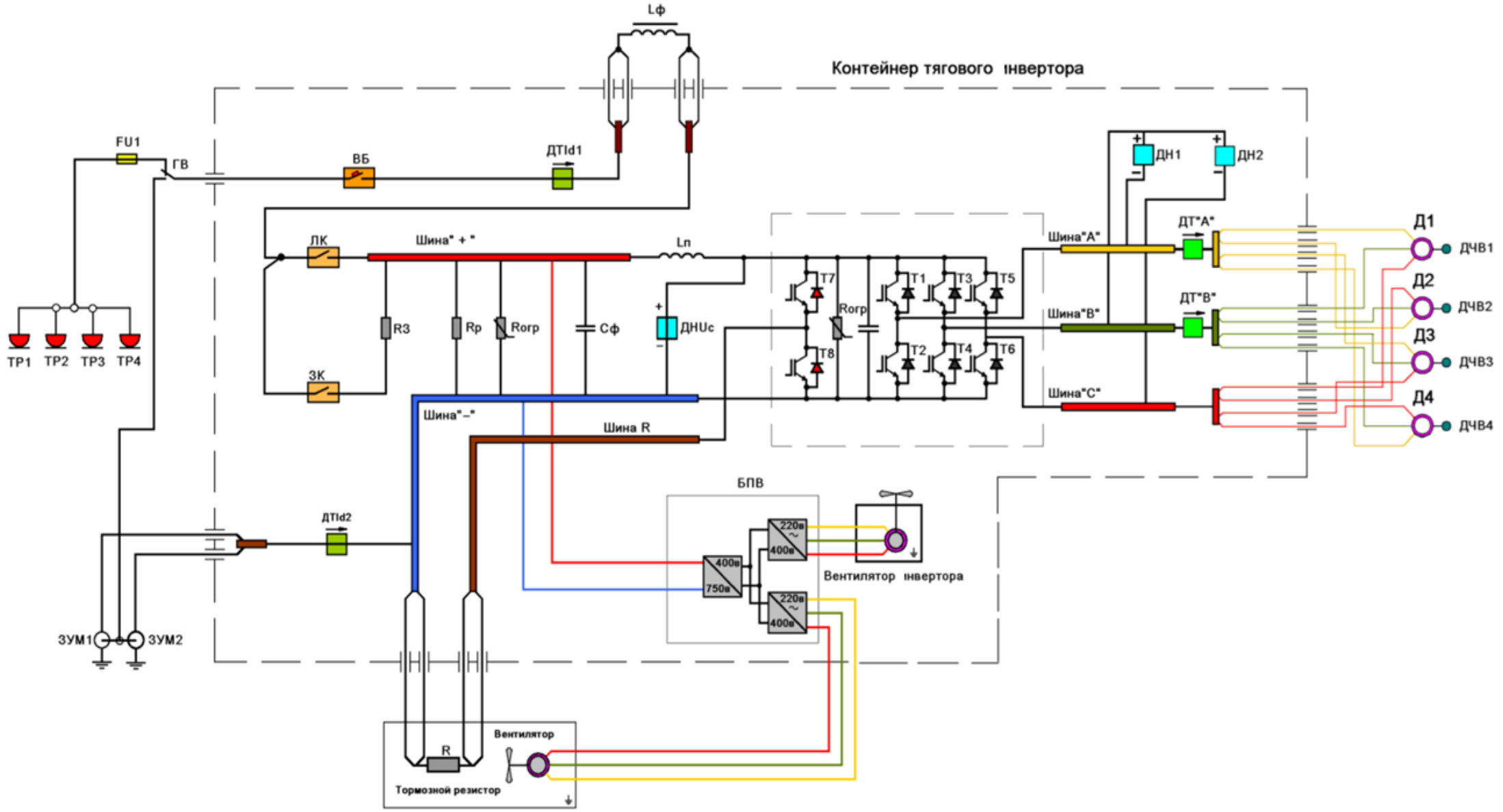
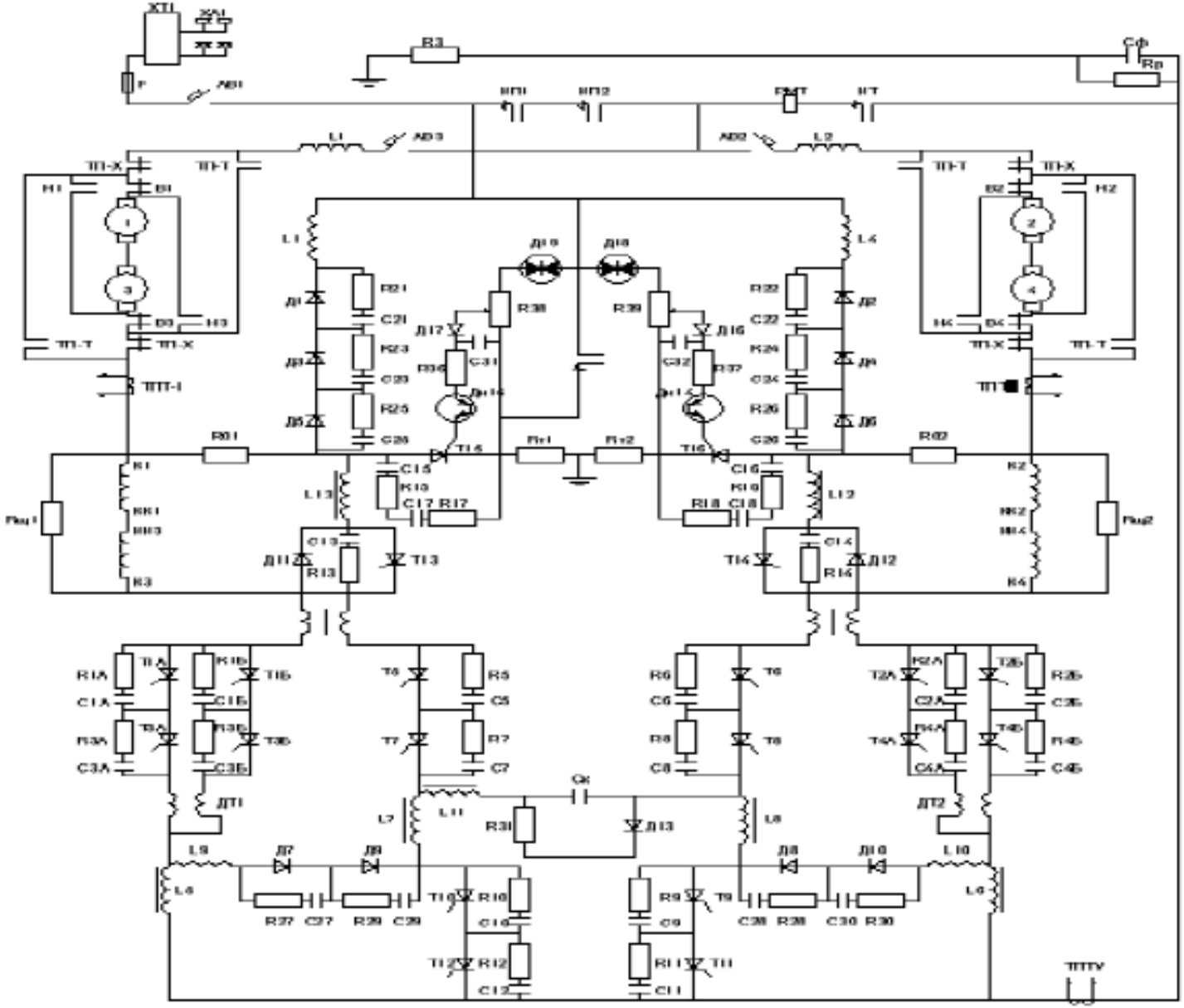
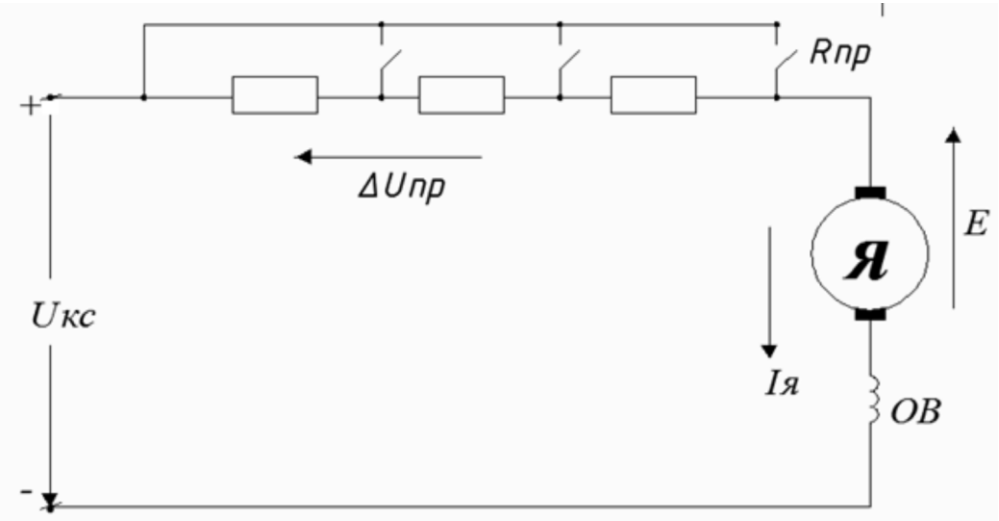


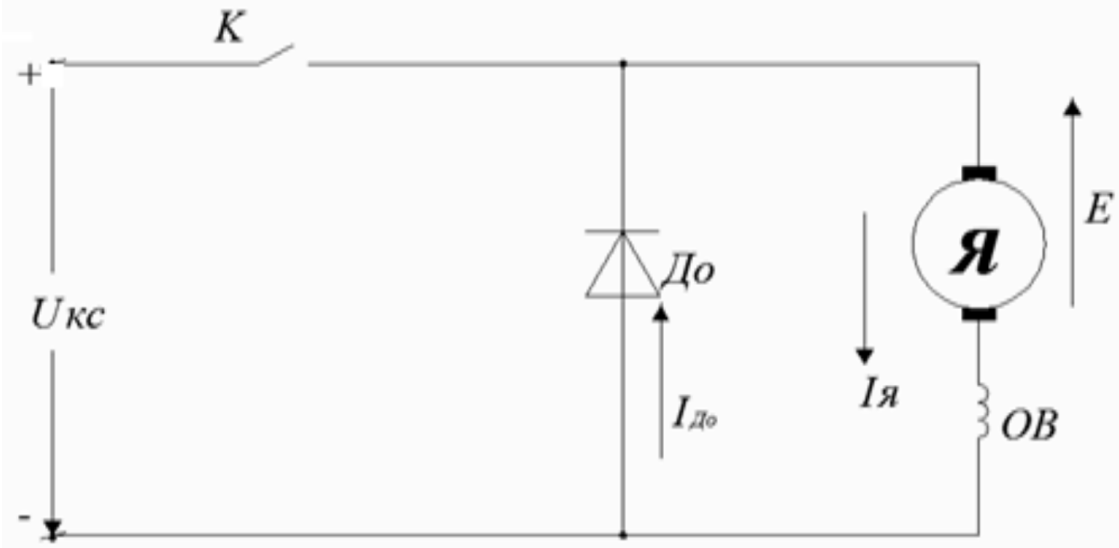
Схема силових ланцюгів вагона метро з тиристорно-імпульсним управлінням



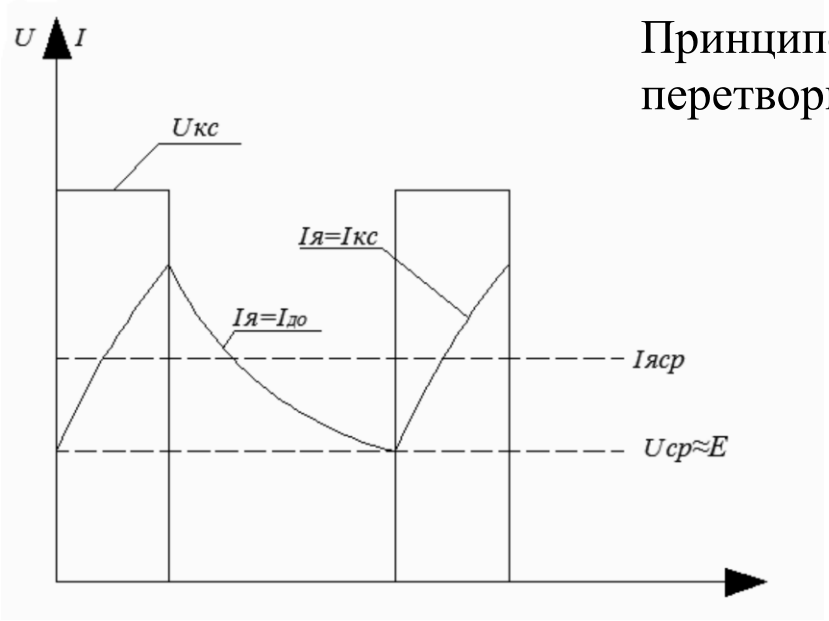
Принципи роботи системи силових ланцюгів ЕРС



Ступінчасте регулювання опору $R_{пр}$

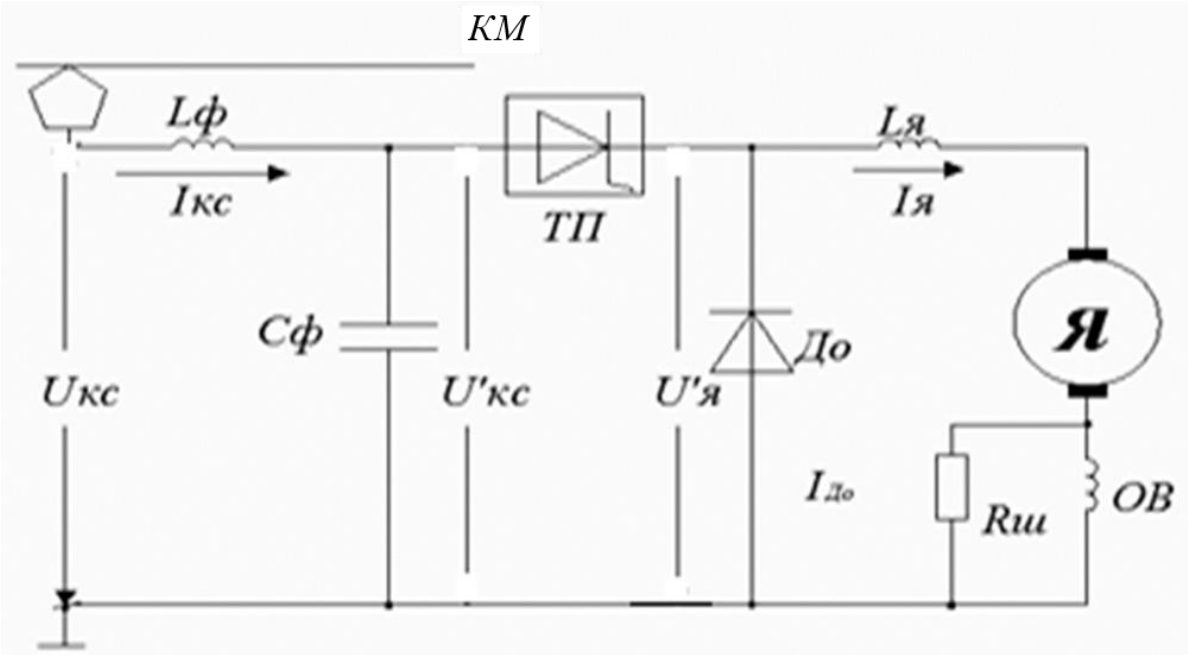


Принципова схема приводу з імпульсним перетворювачем в режимі тяги

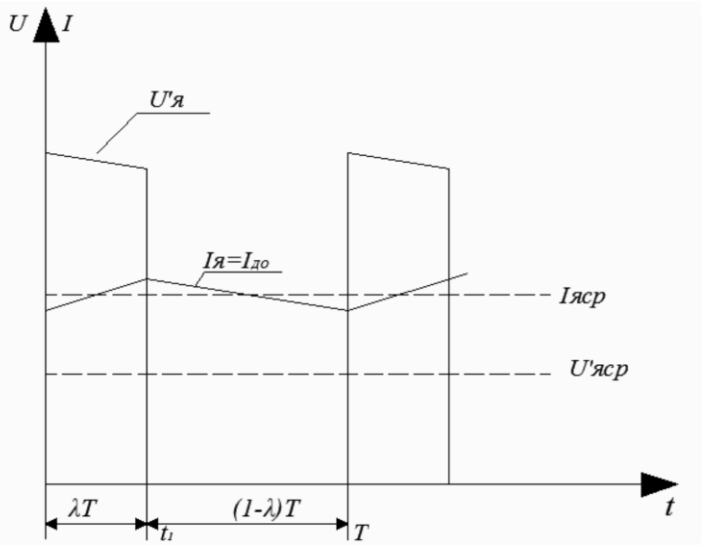


Осцилограми при імпульсному регулюванні

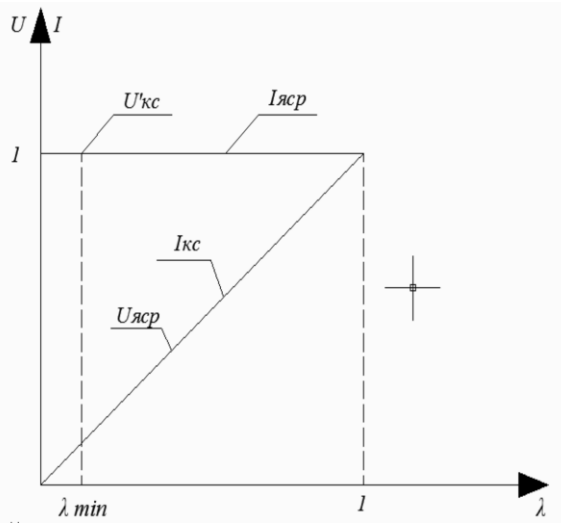
Принципи роботи системи силових ланцюгів ЕРС з тиристорно-імпульсним управлінням



Силова схема з тиристорно-імпульсним управлінням, що включає індуктивність $L_я$ та резистор $R_ш$

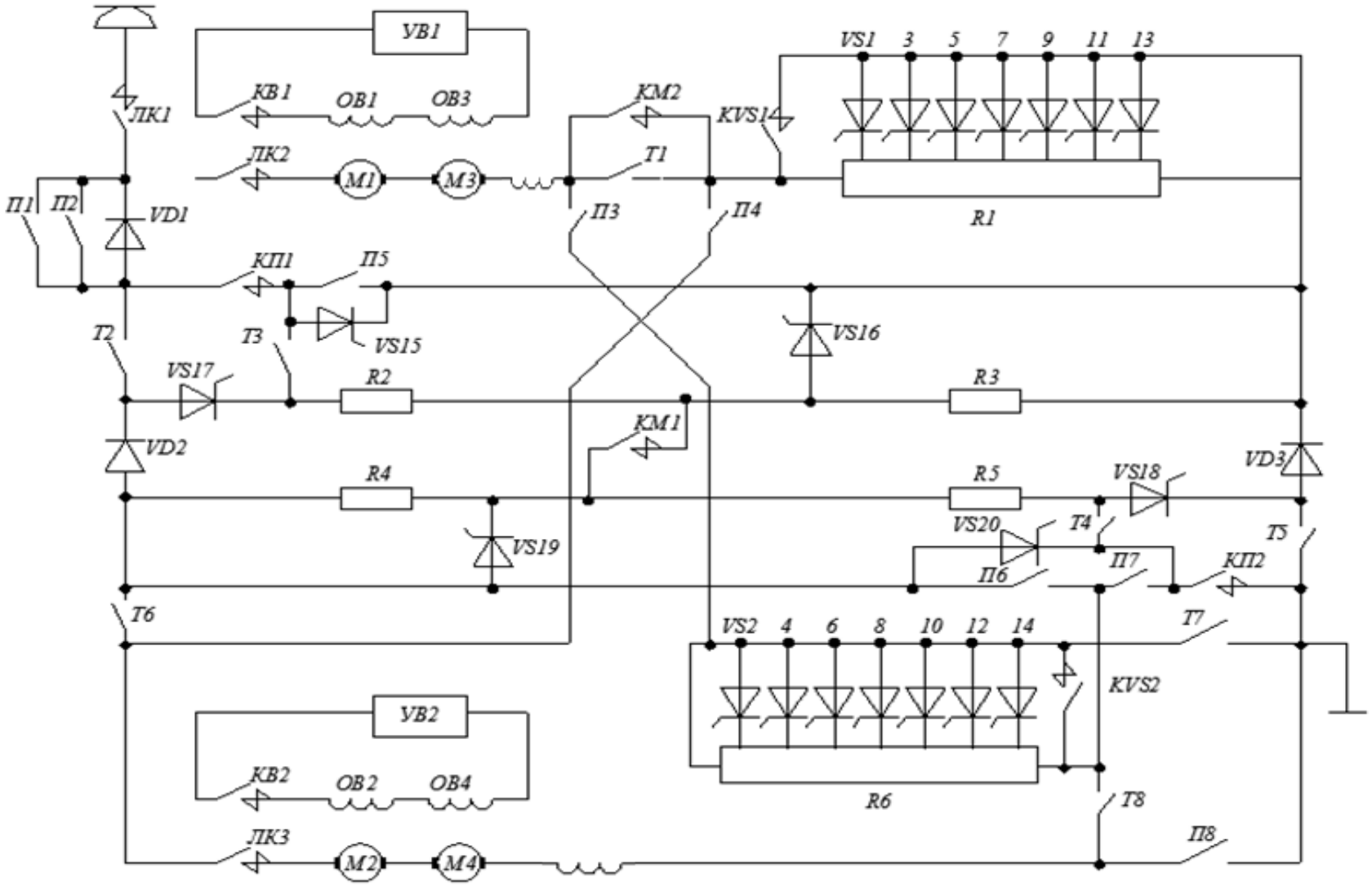


Діаграма зміни миттєвих і середніх значень струму та напруги

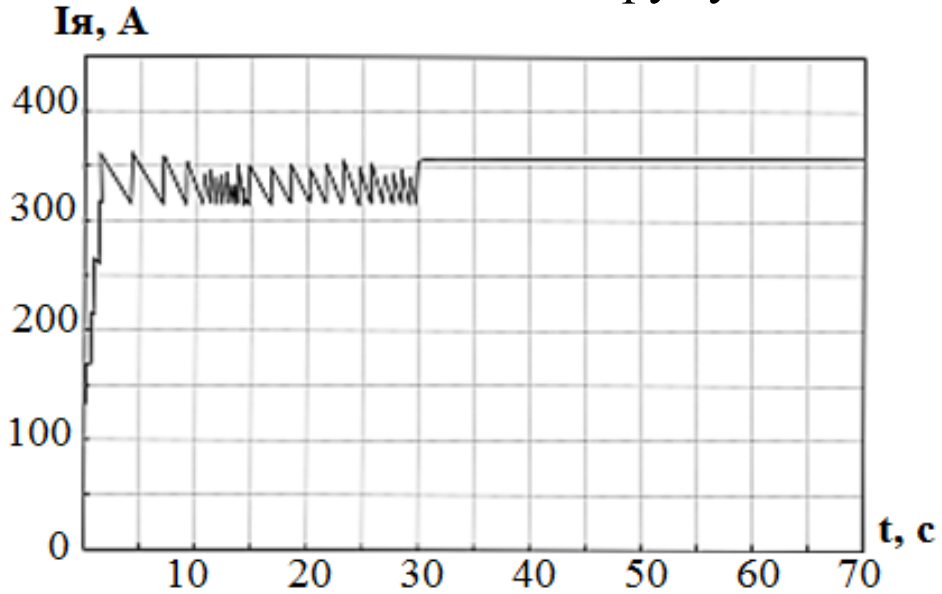


Діаграма зміни струму і напруги

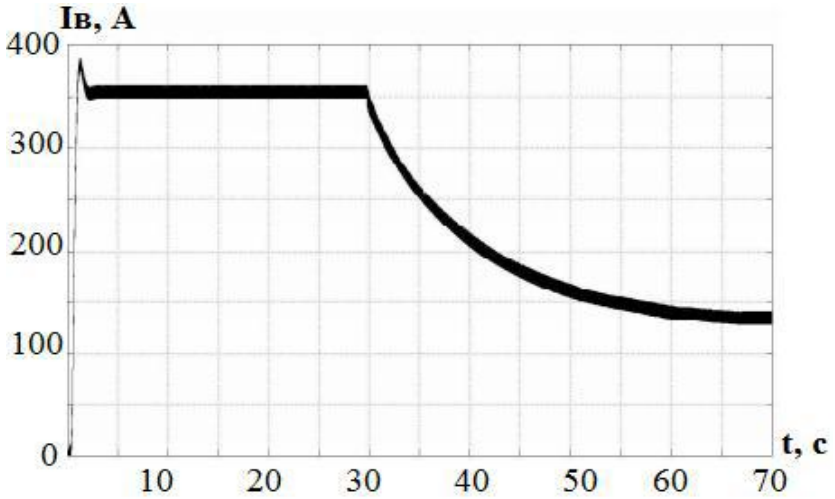
Принципова силова схема вагона метрополітену з системи незалежного збудження тягових машин та тиристорно-реостатного контролера



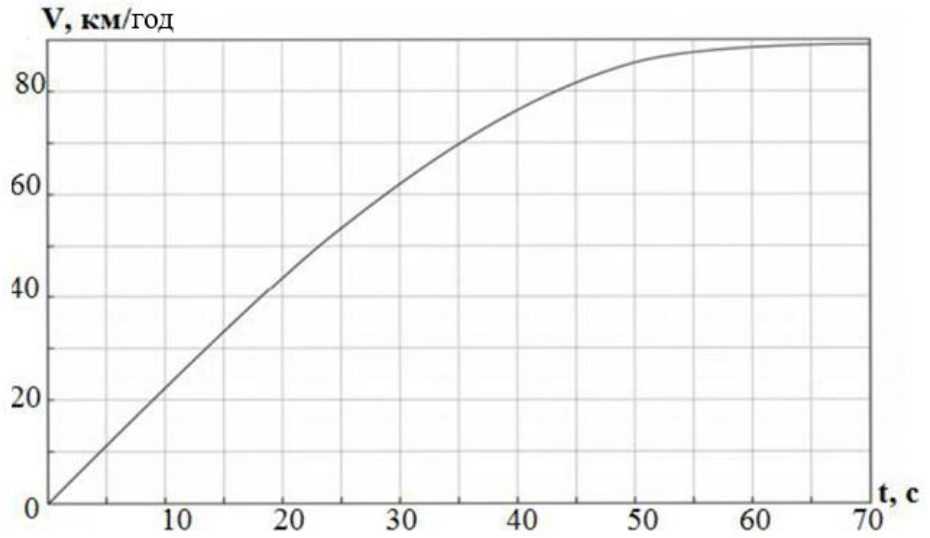
Графіки зміни струму якоря (а), струму збудження (б) і швидкості руху вагона (в) під час роботи системи автоматичного регулювання для стабілізації струму після виходу на автоматичну характеристику



а)

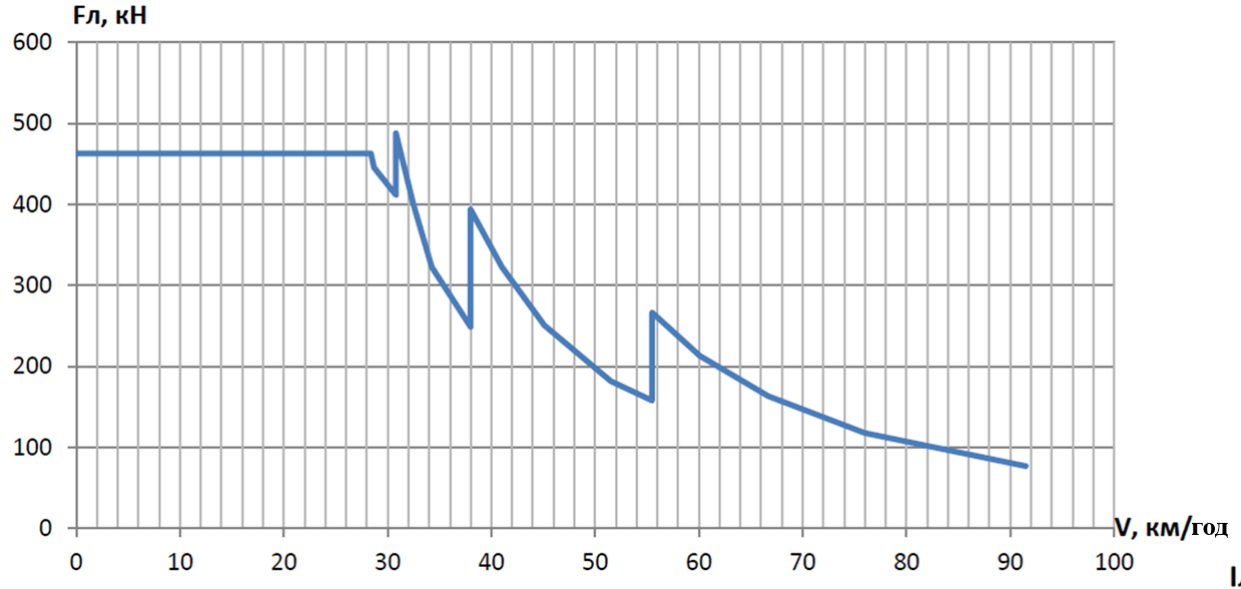


б)



в)

Тягова характеристика і побудова кривої споживаного поїздом струму

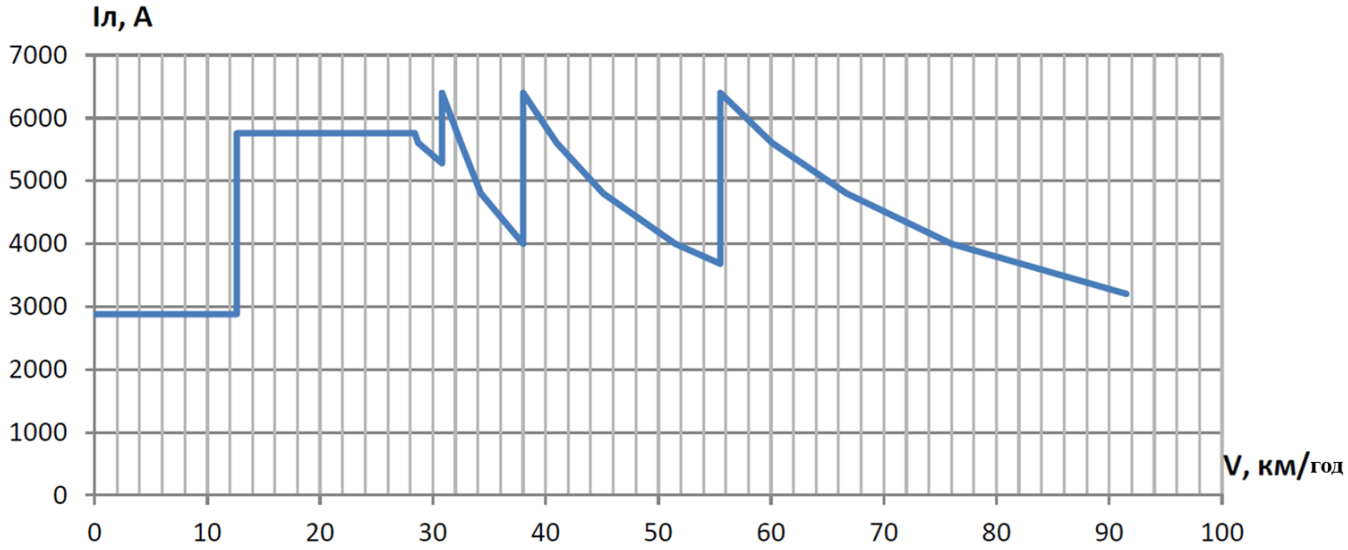


$$F_{л} = F_{д} \cdot Z_{м} \cdot n_{в}$$

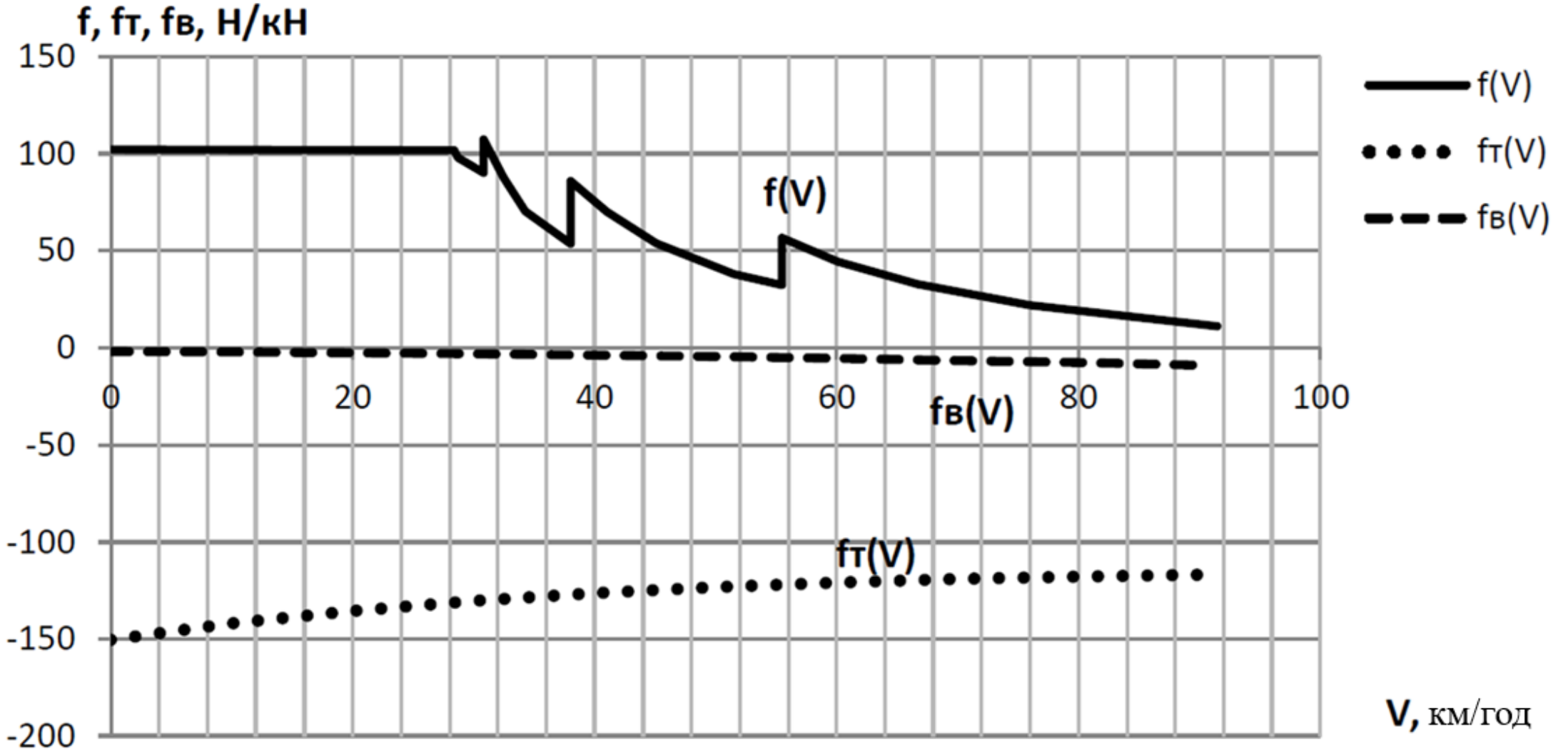
Тягова характеристики поїзда $F_{л} = f(V)$

$$I_{л} = I \cdot Z_{п} \cdot n_{в}$$

Крива споживаного струму $I_л = \varphi(V)$



Залежність діючих сил на поїзд в режимах тяги, гальмування та вибігу від швидкості руху



$E_1 + E_2 + \ldots + E_k$

ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ від впровадження розробки

Показник	Розрахунковий період (роки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Капітальні вкладення K_t, тис.грн.	500,96									
Економія поточних витрат Δu_t, тис. грн	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44
Економічний ефект E_t, тис.грн.	534,483	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44	1035,44
Коефіцієнт приведення	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62	0,56	0,51	0,47	0,42
Економічний ефект з урахуванням приведення	534,483	942,25	859,41	776,58	704,1	641,97	579,84	528,07	486,65	434,88
Економічний ефект наростаючим підсумком тис.грн.	**534,483**	**1476,73**	**2336,15**	**3112,73**	**3816,83**	**4458,81**	**5038,66**	**5566,73**	**6053,39**	**6488,28**

Висновки

В магістерській роботі проаналізовані різні типи ТЕП, які краще використовувати на ЕРС. У кожній системі ТЕП є свої плюси та мінуси. По аналітичному огляду показує, що доцільність застосування ЕРС тієї чи іншої типу ТЕП визначається експлуатаційними вимогами. Виконано порівняльний аналіз переваг та недоліків систем ТЕП вагонів метро з різними видами тягових двигунів та в результаті виявлено такі висновки:

- показано, що при використанні на моторних вагонах ТІУ поступається ДРУ за багатьма показниками (тягові та гальмівні властивості, псування енергії, ефективність рекуперації тощо) та заміна ДРУ на ТІУ призводить до подорожчання та збільшення маси електроустаткування та не підвищує його надійність.

- показано, що для створення надійного безколекторного ТЕП стосовно умов роботи ЕРС потрібно провести великий обсяг дослідницьких і конструкторських робіт, пов'язаних з розробкою вузлів і макетуванням перетворювача. Крім цього, для впровадження ЕРС із АТМ необхідність створення спеціалізованою ремонтної бази, витрати на яку у кілька разів перевищують витрати на експлуатацію електроустаткування серійних реостатних вагонів.

- наведено порівняння надійності приводів, що ґрунтується на статистиці експлуатації та показано, що привід на підставі АТМ не матиме переваг по надійності, тому запропоновано модернізувати силову схему керування двигуном. постійного струму заміною контакторного обладнання безконтактним. Це вимагає набагато менших капіталовкладень, але при цьому з'являється можливість оснащення поїздів хоч і складною, але ефективною системою контролю, діагностики та захисту електричних ланцюгів, що суттєво підвищує надійність та ремонтопридатність ЕРС.

- встановлено, що в тязі середніх потужностей та середніх швидкостей (у тому числі для метропоїздів) привід змінного струму не є обов'язковим. Оцінка ефективності ТМ за значеннями їх ККД на номінальних режимах роботи показала, що при потужності приводу до 300 кВт, ТМ ПТ ефективніше за АТМ, оскільки має більш високі значення ККД.

- показано, що резерви покращення техніко-економічних показників ЕРС із колекторними тяговими машинами постійного струму (КТМ) далеко ще не вичерпані і за їх використанні застосування ЕРС з ТМ ПТ економічно доцільніше.

Звіт подібності

Метадані

Назва організації
Ukrainian State University of Railway Transport

підрозділ
Кафедра "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

Заголовок
Дослідження систем тягового електроприводу поїздів метрополітену

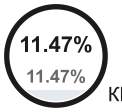
Автор
Шевченко Сергій Олександрович

Науковий керівник / Експерт
Семененко Юрій Олександрович

Кількість слів	Кількість символів	Дата звіту	Дата редагування	ІД документу
5072	**38213**	**12/30/2025**	**---**	**333011432**

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



КП 1

5072
Кількість слів

38213
Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв	R	33
Інтервали	A→	3
Мікропробіли	·	4
Білі знаки	R	0
Парафрази (SmartMarks)	a	55

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз — Колір тексту

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	Розробка та визначення раціональних параметрів функціонування системи керування прохідницького щита для будівництва тунелів в умовах станції «Дорогожичі» Київського метрополітену [redacted] 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	132 2.60 %

2	Розробка та визначення раціональних параметрів функціонування системи керування прохідницького щита для будівництва тунелів в умовах станції «Дорогожичі» Київського метрополітену [redacted] 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	95 1.87 %
3	Розробка та визначення раціональних параметрів функціонування системи керування прохідницького щита для будівництва тунелів в умовах станції «Дорогожичі» Київського метрополітену [redacted] 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	81 1.60 %
4	Розробка та визначення раціональних параметрів функціонування системи керування прохідницького щита для будівництва тунелів в умовах станції «Дорогожичі» Київського метрополітену [redacted] 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	44 0.87 %
5	АКФ-2023-151-Оліксейчука_М.А._ [redacted] 7/11/2024 Ukrainian national aviation university (Ukrainian national aviation university)	40 0.79 %
6	АКФ-2023-151-Оліксейчука_М.А._ [redacted] 7/11/2024 Ukrainian national aviation university (Ukrainian national aviation university)	38 0.75 %
7	АКФ-2023-151-Оліксейчука_М.А._ [redacted] 7/11/2024 Ukrainian national aviation university (Ukrainian national aviation university)	29 0.57 %
8	АКФ-2023-151-Оліксейчука_М.А._ [redacted] 7/11/2024 Ukrainian national aviation university (Ukrainian national aviation university)	28 0.55 %
9	АКФ-2023-151-Оліксейчука_М.А._ [redacted] 7/11/2024 Ukrainian national aviation university (Ukrainian national aviation university)	27 0.53 %
10	АКФ-2023-151-Оліксейчука_М.А._ [redacted] 7/11/2024 Ukrainian national aviation university (Ukrainian national aviation university)	23 0.45 %

з бази даних RefBooks (0.00 %)

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)

з домашньої бази даних (0.00 %)

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)

з програми обміну базами даних (11.47 %)

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	Розробка та визначення раціональних параметрів функціонування системи керування прохідницького щита для будівництва тунелів в умовах станції «Дорогожичі» Київського метрополітену [redacted] 3/15/2025 **National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)**	**368 (5) 7.26 %**

2	АКФ-2023-151-Оліксейчука_М.А._ [redacted] 7/11/2024 **Ukrainian national aviation university (Ukrainian national aviation university)**	**198 (8) 3.90 %**
3	dm_2024_031_141_061 [redacted] 12/9/2024 O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv)	16 (1) 0.32 %

з Інтернету (0.00 %)

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ДЖЕРЕЛО URL	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)

Список прийнятих фрагментів

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗМІСТ	КІЛЬКІСТЬ ОДНАКОВИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)