

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи бакалавра

**за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Модернізація тягової електромеханічної системи рудникового
електровоза типу К-10**

Виконав: студент групи ЕЕМ-21-2

Владислав АФАНАСЕНКОВ

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

Нормо контролер _____ к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

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

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

Кривий Ріг 2025 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

АФАНАСЕНКОВ Владислав Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Модернізація тягової електромеханічної системи рудникового
електровоза типу К-10

1. Термін подання студентом роботи: 20 червня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є модернізація
тягової тягової електромеханічної системи рудникового електровоза
типу К-10. Завданням досліджень є підвищення тягових властивостей
рудникового електровозу за рахунок застосування комбінованого
приводу з інтеграцією додаткового лінійного асинхронного двигуна.
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно
розробити): I. Аналіз стану питання; II. Розробка концепції
комбінованого приводу; III. Розрахунок раціональних параметрів
комбінованого електроприводу.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень): I. Аналіз стану питання; II. Проблеми традиційних тягових
приводів; III. Лінійний асинхронний двигун: принцип роботи; IV.
Концепція комбінованого приводу; V. Функціональна схема приводу; VI.
Структурна схема приводу; VII. Розрахунок параметрів та
моделювання.

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Визначення актуальності, об'єкта, предмета, мети та завдань роботи	13.05.25
2	Дослідження історії розвитку рудникових електровозів	16.05.25
3	Аналіз традиційних тягових приводів та їх недоліків	18.05.25
4	Формування концепції комбінованого приводу	24.05.25
5	Розробка функціональної схеми	27.05.25
6	Розробка структурної схеми	30.05.25
7	Проведення розрахунків параметрів приводу	03.06.25
8	Оцінка ефективності системи за допомогою чисельних моделей	10.06.25
9	Порівняння тягових характеристик з ЛАД і без нього	13.06.25
10	Підведення підсумків та оформлення роботи	17.06.25

Дата видачі завдання: 12.05.2025 р.

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Владислав АФАНАСЕНКОВ

(ім'я, прізвище)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Ігор СІНЧУК

(ім'я, прізвище)

Реферат

У даній роботі досліджується перспективний шлях оновлення шахтного електротранспорту, передбачаючи введення комбінованої системи приводу. Вона об'єднує звичний тяговий двигун з лінійним асинхронним двигуном. Ключова ціль – поліпшення тягових показників та заощадження енергії електровозів у складних підземних середовищах, особливо на великих схилах, на слизьких ділянках та в умовах недостатнього зчеплення коліс з рейками.

Кількість:

Сторінок – 58;

Джерел – 11;

Рисунків – 18.

У першому розділі здійснено аналіз поточного стану тягових систем шахтних локомотивів. Виявлено їхні недоліки, зокрема залежність тягової сили від зчеплення коліс із рейками. В дослідженні доведено важливість використання додаткового приводу на базі ЛАД, що генерує тягову силу через електромагнітну взаємодію і функціонує незалежно від характеристик зчеплення чи ухилу колії.

У другому розділі зосереджено увагу на створенні концептуальної та структурної схеми комбінованого приводу, котрий функціонує в автоматичному режимі. Додатковий привід активується лише тоді, коли основний відчуває перевантаження чи пробуксовування коліс. Побудовано математичну модель системи, що бере до уваги її динамічні характеристики. Визначено функціональні зв'язки, які забезпечують злагоджену роботу обох приводів, та запропоновано алгоритм управління з застосуванням блоку синхронізації. Результати проведеного моделювання свідчать про те, що запропонована система значно покращує показники надійності та безпеки.

У третьому розділі представлено детальний аналіз запропонованої комбінованої системи приводу. Розроблено методику для визначення

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимальної сили тяги ЛАД з урахуванням різних експлуатаційних факторів: протяжності шляху, ухилу, коефіцієнту зчеплення, обсягу перевезень та швидкості руху потягу. Запропоновано алгоритм управління ЛАД, що передбачає використання адаптивних контурів зворотного зв'язку за струмом та ковзанням для забезпечення стабільної ефективності системи. Результати моделювання показують, що застосування комбінованого приводу дозволяє збільшити вагу потягу при збереженні тієї ж маси зчеплення, зменшити кількість рейсів, збільшити середню швидкість руху. Доведено, що продуктивність системи значною мірою залежить від правильного співвідношення тягових характеристик та конструкції ЛАД. За умов крутих підйомів або низького зчеплення ЛАД виявляє себе особливо ефективно, навіть перевищуючи можливості основного приводу.

Ключові слова: *КОМБІНОВАНИЙ ПРИВІД, РУДНИКОВИЙ ЕЛЕКТРОВОЗ, ЛІНІЙНИЙ АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, СИЛА ТЯГИ, СТРУКТУРНА СХЕМА.*

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. Розділ 1. Аналіз стану питання	10
1.1. Історія та розвиток рудних електровозів	11
1.2. Традиційні тягові приводи: характеристики та обмеження	16
1.3. Вплив зчеплення та ухилів на тягові властивості	18
1.4. Лінійні асинхронні двигуни: принцип дії, переваги і недоліки	22
1.5. Аналіз наявних реалізацій комбінованих систем	26
2. Розділ 2. Розробка концепції комбінованого приводу	29
2.1. Теоретичні основи застосування ЛАД у комбінованому приводі	30
2.2. Функціональна схема комбінованого приводу	32
2.3. Структурна схема комбінованого приводу	34
2.4. Умови включення ЛАД у роботу	37
3. Розділ 3. Розрахунок раціональних параметрів комбінованого електроприводу	39
3.1. Алгоритм розрахунку раціональних параметрів комбінованого приводу	40
3.2. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на раціональні параметри комбінованого електроприводу	44
3.3. Система керування додатковим електроприводом	52
ВИСНОВОК	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	57

ВСТУП

Сучасна гірничодобувна промисловість характеризується ускладненням умов експлуатації транспортних систем у підземних виробітках. Підвищені вимоги до безпеки, енергоефективності та стабільності перевезень, а також збільшення глибини шахт та складності профілю шляху потребують впровадження нових технічних рішень у конструкції рухомого шахтного складу. Одним із ключових елементів підземного транспорту залишається шахтний електровоз, від якого безпосередньо залежить надійність та продуктивність перевезень. Однак класичні електровози з традиційним тяговим приводом демонструють обмежені можливості при зниженні зчеплення коліс з рейками, наприклад, через вологу, забруднення або ухили. Це призводить до пробуксування, зниження тягових характеристик та збільшення експлуатаційних втрат.

На фоні цього посилюється інтерес до розробки комбінованих тягових систем, здатних компенсувати недоліки традиційних рішень. Особлива увага приділяється застосуванню лінійного асинхронного двигуна ролі додаткового приводу, незалежного від механічного зчеплення. Такий підхід дозволяє стабілізувати рух електровоза під час перевантажень або на ділянках з підвищеним ухилом, знизити зношування ходової частини та підвищити надійність підземного транспорту. Впровадження комбінованого приводу також відкриває можливості реалізації адаптивних алгоритмів управління, що особливо важливо за умов нестабільного коефіцієнта зчеплення. Дослідження таких систем є актуальним напрямом підвищення ефективності та стійкості шахтних транспортних засобів.

Основною метою роботи є підвищення тягових властивостей шахтного електровоза за рахунок застосування комбінованого приводу з інтеграцією додаткового лінійного асинхронного двигуна. Така система призначена для компенсації втрат зчеплення та підвищення стійкості руху у складних експлуатаційних умовах. У межах роботи вирішуються такі завдання: аналізуються обмеження традиційних тягових систем; досліджуються

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

принципи роботи лінійних двигунів та можливість їх застосування у складі тягової системи; розробляється концепція комбінованого приводу з автоматичним керуванням; аналізується вплив додаткового приводу на тягові характеристики та енергетичну ефективність. Крім того, оцінюється доцільність запровадження запропонованого рішення у шахтний транспорт на практиці.

Об'єктом дослідження є шахтний електровоз – спеціалізований засіб шахтного транспорту, що експлуатується в умовах обмеженого простору, підвищеної вологості, пилу та змінних навантажень. Предметом дослідження виступає структура та функціонування комбінованого тягового приводу, що включає традиційний та додатковий лінійний двигун. Розглядаються тягові характеристики за різних умов руху, вплив зчіплення та ухилів шляху на ефективність тяги, а також поведінку системи керування при включенні допоміжного приводу. Особлива увага приділяється адаптивності системи та її здатності підтримувати стійкий рух у нестабільному зчіпному середовищі.

Методологічна основа роботи включає теоретичний аналіз, математичне моделювання та чисельні методи. Дослідження базується на системному підході до електровозу як мехатронної системи, в якій взаємодіють електричні, механічні та керуючі компоненти. Математична модель включає електромеханічні рівняння, кінематику та параметри зчіплення. Розробка алгоритмів управління здійснюється із застосуванням принципів замкнутого контуру із зворотним зв'язком, що забезпечує автоматичне включення додаткового приводу при пробуксуванні або перевантаженні.

Імітаційне моделювання реалізується з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, що дозволяє досліджувати тягову систему у різних експлуатаційних сценаріях без проведення натурних випробувань. Результати моделювання дають кількісну оцінку ефективності застосування комбінованого приводу і є основою для практичних рекомендацій.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наукова новизна дослідження полягає у комплексній реалізації адаптивного комбінованого приводу з автоматичним керуванням, орієнтованого на умови нестабільного зчіплення. В роботі розглядаються як принципи дії системи, так і алгоритми узгодження двох типів приводу у динаміці. Практична значущість полягає у можливості застосування результатів при модернізації існуючих електровозів, а також при проектуванні нових моделей для роботи в умовах з обмеженою зчіпною масою та змінними навантаженнями. Отримані дані можуть бути використані для підвищення стійкості, безпеки та енергоефективності шахтного транспорту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.
АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>дата</i>	Розділ 1	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		Афанасенков В.В					10	19
<i>Перевір.</i>		Сінчук І.О						
<i>Н. Контр.</i>		Сінчук І.О						
<i>Затверд.</i>		Пересулько І.І.				КНУ ЕЕМ-21-2		

1.1 Історія та розвиток рудних електровозів

Розвиток шахтного транспорту тісно переплетений з еволюцією гірничодобувної галузі, що потребує безперервного вдосконалення технічних засобів транспортування корисних копалин. Одним з найважливіших етапів у цій сфері стало впровадження шахтних електровозів – самохідних тягових машин, що використовують електричну енергію як джерело руху та розроблені спеціально для роботи під землею.

Перші спроби механізувати транспортні операції в шахтах датуються кінцем XIX – початком XX століття, коли почали використовувати парові та пневматичні локомотиви. Проте високий ризик пожеж, обмежені запаси пари та складність в експлуатації робили такі рішення непрактичними в закритих підземних умовах.

Перехід до електровозної тяги став можливим з появою компактних та безпечних електричних машин, а також із будівництвом перших мереж електропостачання в шахтах. На початку XX століття в Німеччині та Великобританії почали використовувати провідникові електровози, що отримували живлення від контактного дроту або шинопроводу, прокладеного вздовж колії. У Радянському Союзі широке застосування шахтних електровозів розпочалось з 1920-х років. Вже до 1930-х років електровози стали головним видом шахтного тягового транспорту на вугільних та рудних шахтах.

З розвитком електрифікації шахт поширились акумуляторні електровози, особливо на вугільних шахтах, де наявність вибухонебезпечних газів (метану) виключала використання контактних мереж. Використання акумуляторних батарей дозволяло забезпечити безпеку експлуатації, але накладало обмеження на тривалість роботи та тягове зусилля.

Розвиток шахтних електровозів умовно поділяється на декілька періодів: механізації, електрифікації, модернізації та сучасний етап.

1. Період механізації (до 1930-х років)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На ранніх етапах видобутку корисних копалин транспортування здійснювалося вручну або із залученням тварин. Зі збільшенням глибини та обсягу видобутку з'явилася необхідність у механічних засобах тяги.

Спочатку застосовувалися парові та пневматичні локомотиви:

- Парові локомотиви працювали на вугіллі або мазуті, що було небезпечно та незручно в шахтних умовах через обмежений вентиляційний об'єм та ризик пожеж.
- Пневматичні локомотиви працювали на стислому повітрі, мали відносно просту конструкцію, але були обмежені в дальності дії та потужності.

Незначна ефективність цих рішень та високий рівень аварійності призвели до пошуку нових, безпечніших та більш економічних технологій.

2. Період електрифікації (1930-1960 роки)

З розвитком електропостачання та появою електродвигунів достатньої потужності розпочався активний перехід до електровозної тяги. Перевагами стали відсутність шкідливих викидів, компактність та простота керування.

В ті часи з'явилися:

- Контактні електровози, які живились від шинопроводу або контактного дроту (особливо в рудних шахтах з гарною вентиляцією);
- Акумуляторні електровози, незамінні в умовах, де присутні вибухонебезпечні гази (метан, пил) – переважно у вугільних шахтах.

На цьому етапі розвиваються основні типорозміри електровозів, формуються підходи до розрахунку тягового зусилля, систем гальмування та захисту.

3. Період модернізації (1960-1990 роки)

З середини XX століття розвиток шахтних електровозів увійшов до стадії активної технічної модернізації, що було зумовлено збільшенням глибини шахт, розширенням обсягів гірничих робіт та підвищенням вимог до продуктивності транспорту. Протягом цього періоду відбулось значне удосконалення конструкції електровозів, їхніх електричних схем та систем управління.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Шахтний транспорт ставав все складнішим, і простий ручний чи реостатний контроль тягових двигунів не задовольняв потреби в точному і надійному керуванні. Розробка та впровадження тиристорних перетворювачів дозволила плавно регулювати напругу та струм тягових машин, забезпечуючи стабільнішу роботу на різних режимах навантаження та підвищуючи ефективність використання енергії. Широкого поширення набули системи управління з використанням тиристорів як на самих електровозах, так і в складі стаціонарних тягових підстанцій, які живлять контактну мережу.

Особливу увагу приділяли питанню стійкості тяги та запобіганню пробуксовуванню, особливо на ділянках з ухилами. Почали впроваджувати елементи автоматичного регулювання, включаючи системи компенсації просідання напруги, а також захист від перевантажень та перегріву обмоток тягових двигунів. Конструктивно вдосконалювалося компонування, підвищувалась надійність механічних вузлів, одночасно відбувалося впровадження нових матеріалів в ізоляції, корпусах та акумуляторних батареях.

Акумуляторні електровози також зазнали значних змін. З одного боку, збільшувалась ємність батарей та надійність зарядних пристроїв, з іншого – удосконалювалися методи контролю заряду та автоматичного відключення при перевищенні струмів, що безпосередньо впливало на безпеку роботи в підземних умовах з високою концентрацією газу.

Поміж цього, саме в цей період зароджуються принципи комбінування різних систем приводу, з'являється розуміння, що одиночна система може бути неефективною за мінливих умов шахтного шляху. У науковому середовищі починають обговорювати можливості резервного або допоміжного приводу, здатного тимчасово компенсувати втрату зчеплення або недостатню потужність основного двигуна.

4. Сучасний етап (з 1990-х років до сьогодення)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Від кінця XX століття і дотепер еволюція шахтних електровозів супроводжується бурхливою цифровою трансформацією, впровадженням інтелектуальних систем управління та використанням сучасних типів електричних машин. Актуальні умови експлуатації, які включають значні ухили, складну конфігурацію рейкової колії, підвищену вологість, обмежений простір та суворі вимоги безпеки, зумовили появу новітніх інженерних рішень, що вийшли за рамки традиційної схеми "електродвигун – редуктор – колісна пара".

Одним з ключових трендів стало впровадження мікропроцесорних систем управління. Поява програмованих логічних контролерів (ПЛК) відкрила можливості для реалізації складних алгоритмів запуску, регулювання та захисту, що базуються на аналізі значної кількості вхідних даних – від швидкості та сили струму до температури обмоток та ковзання коліс. Такі системи не лише збільшили надійність роботи, а й проклали шлях до автоматизації, включаючи дистанційне керування, телеметрію та адаптивне регулювання тягового зусилля з урахуванням специфіки колії.

Паралельно з технічним прогресом вдосконалювалися силові агрегати приводу. Асинхронні двигуни з можливістю зміни частоти, які управлялися перетворювачами ширини імпульсів, замінили менш надійні колекторні приводи. Використання частотно-регульованих приводів дало можливість точніше та м'якше регулювати тягу, особливо в ситуаціях з обмеженим контактом. З розвитком силової електроніки інвертори стали меншими за розмірами, більш економними та безпечними для використання у видобувних виробництвах.

Одним з ключових завдань, яке не втрачає актуальності протягом багатьох років, є забезпечення надійного зчеплення коліс електровозів з рейками. В умовах підвищеної вологості та забрудненості шахтних шляхів це зчеплення може помітно погіршуватися, що викликає пробуксовування, зменшення ефективності переміщення вантажів та знос ходових частин. Це спонукало до пошуку принципово нових технічних рішень, зокрема – до

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

впровадження лінійних асинхронних двигунів, де тягове зусилля виникає завдяки електромагнітній взаємодії між індуктором та статичним вторинним елементом, розташованим вздовж колії. Ці двигуни мають декілька плюсів: не залежать від коефіцієнта зчеплення, можуть реалізовувати тягу за умови повного ковзання та забезпечують стабільну роботу на низьких швидкостях.

Попри деякі технологічні труднощі – наприклад, необхідність підтримання мінімального зазору між індуктором і вторинним елементом, або порівняно низький ККД при живленні від промислової частоти – лінійні двигуни знайшли своє застосування у спеціалізованих випадках. Зокрема, вони стали використовуватися у складі комбінованих приводів, де виконують роль додаткового тягового джерела, що активується при пробуксовуванні або на ділянках з ухилом, що перевищує допустиме значення для основного приводу. Цей напрям виявився особливо перспективним за умов, коли потрібна висока надійність за нестабільних умов зчеплення.

Окрім цього, сучасні системи включають елементи адаптивного управління, здатні автоматично змінювати параметри приводу залежно від поточних умов роботи. На деяких моделях електровозів реалізовані системи активного гальмування, стабілізації швидкості та діагностики в реальному часі. Усі ці особливості перетворюють сучасні рудникові електровози на інтелектуальні транспортні засоби, що відповідають вимогам промисловості нового технологічного укладу.

Отже, історія еволюції шахтних електровозів є процесом постійного ускладнення технічних рішень, пов'язаних з необхідністю підвищення безпеки, надійності та продуктивності підземного транспорту. Перехід від класичних тягових систем до комбінованих, які використовують лінійні двигуни як додаткове джерело тяги, є логічним етапом технічного розвитку в умовах обмеженого зчеплення та значних ухилів, характерних для сучасних гірничих підприємств.

Для підвищення енергоефективності застосовуються інверторні системи керування з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), що

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

дозволяють точно регулювати швидкість та крутний момент. Також повсюдно здійснюється перехід на асинхронні двигуни з частотним керуванням, що не потребують обслуговування колектора.

Для автоматизації та інтелектуального управління сучасні електровози оснащуються програмованими контролерами (ПЛК), що забезпечують реалізацію логіки пуску/зупинки, захисту та діагностики. Розробляються системи дистанційного моніторингу з передаванням даних на диспетчерські пункти та впроваджується автоматичне регулювання тягового зусилля, що особливо актуально за мінливих умов зчеплення та ухилу.

Щоб покращити зчіпні якості, розробляються системи розподіленої тяги, за яких кожен вагон може мати власний привод, запроваджуються гібридні схеми, що включають додаткові лінійні приводи, які не залежать від умов зчеплення з рейками та використовуються протибуксувальні алгоритми на базі датчиків пробуксування, контролерів зчіплення та інерційних систем.

1.2 Традиційні тягові приводи: характеристики та обмеження

Протягом десятиліть класичні тягові приводи були основою руху рудничних електровозів. Їхня простота конструкції, випробувані часом технологічні рішення та порівняно невелика ціна обумовили широке застосування таких приводів у гірничій промисловості. Разом з тим, незважаючи на великий досвід та високий рівень технологічної вдосконаленості, ці системи мають низку недоліків, які ускладнюють їх ефективне використання в сучасних умовах експлуатації.

Основою класичного тягового приводу є електродвигун обертальної дії. Найбільш поширеним варіантом є тяговий двигун постійного струму з послідовним збудженням, який поєднаний з колісною парою за допомогою механічної передачі, зокрема, редуктора. До переваг таких двигунів належать значний пусковий момент, легке регулювання швидкості, що здійснюється шляхом зміни напруги або опору в ланцюгу якоря. Крім того, вони добре взаємодіють із системами керування середнього рівня складності. Проте, ці

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переваги врівноважуються значними недоліками, що виявляються при експлуатації у складних гірничих умовах.

Одною з головних проблем традиційного тягового приводу є залежність тягових властивостей від зціплення коліс з рейками. В умовах шахтних виробок, зокрема на ділянках з нахилом, вологим покриттям рейок, наявністю пилу або мастила коефіцієнт зціплення може суттєво зменшуватися. Це веде до пробуксовування коліс, падіння ефективності тяги та швидкого зносу бандажів і голівок рейок. Коли досягається критична величина ковзання, ефективність приводу різко падає, і електровоз не може забезпечити потрібне тягове зусилля.

Ще одним важливим недоліком є обмежені можливості регулювання тяги та швидкості. Реостатні схеми, які використовувалися на ранніх поколіннях електровозів, пропонували лише ступінчате регулювання, що викликало раптові скачки струму та втрату плавності в управлінні. З часом з'явилися тиристорні та транзисторні системи з широтно-імпульсною модуляцією, що забезпечували точніший контроль, але навіть вони не могли повністю вирішити проблему пробуксовування при зменшенні зчеплення.

Окрім того, у шахтах нерідко зустрічаються підйоми, що перевищують опір рівномірного руху, що вимагає від приводу збільшення тягового зусилля. Проте, згідно з формулою (1.2.1), яка пов'язує тягову силу з масою складу та нахилом колії, стає очевидним, що за наявності заданої зчіпної маси існує обмеження щодо допустимого навантаження. У разі його перевищення електровоз втрачає зчеплення і не може ефективно переміщувати склад, особливо під час початку руху.

Маса складу визначається за формулою:

$$P + Q_{\text{ван.}} = \frac{F_{\text{трив.}}}{\alpha \cdot \sqrt{\tau} \cdot g \cdot (w_{\text{ван.}} - i_{\text{сер.}})}, \quad (1.2.1)$$

де P — маса потягу, т;

$Q_{\text{ван.}}$ — маса причіпної частини, включаючи корисну масу транспортованого вантажу та масу вагонеток, т;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$F_{\text{трив.}}$ – тривала сила тяги електровозу, Н;

$\alpha \cdot \sqrt{\tau} = \frac{F_{\text{трив.}}}{F_{\text{уст.}}}$, де $F_{\text{уст.}}$ – усталена сила тяги, Н;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

w – питомий опір руху, Н/кН;

$i_{\text{сер.}}$ – середній ухил.

Конструкція тягових двигунів теж накладає свої обмеження. Колекторні машини потребують постійної уваги: чищення щіток, заміну зношених деталей, контроль за іскроутворенням. Це знижує надійність роботи та підвищує витрати на технічне обслуговування, особливо у запилених та вологих шахтних умовах.

Окрім того, традиційні приводи важко піддаються автоматизації. Через відсутність вбудованих механізмів адаптивного управління, будь-яка автоматизація потребує встановлення додаткових датчиків та контролерів, що ускладнює систему загалом і збільшує її вартість.

З вищесказаного можна зробити висновок, що незважаючи на широке використання та порівняно невисоку вартість, традиційні тягові приводи не завжди відповідають потребам сучасної гірничої техніки. Їх основними недоліками є залежність від зчеплення, низька ефективність на похилих ділянках, обмежені можливості регулювання та значні експлуатаційні витрати. Усе це зумовлює об'єктивну необхідність переходу до більш передових, адаптивних та стійких до зовнішніх впливів приводних систем, серед яких особливу увагу заслуговує комбінований привод з використанням лінійного асинхронного двигуна, який не залежить від умов зчеплення та має здатність точного управління тяговим зусиллям.

1.3 Вплив зчеплення та ухилів на тягові властивості

Одним з ключових аспектів при проектуванні та експлуатації підземних електровозів є забезпечення надійного тягового зусилля. В умовах шахт ефективність тяги обумовлюється не лише силою привода, а й взаємодією між колесами локомотива та рейками. Саме зціплення коліс з

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рейками та особливості профілю колії, зокрема, наявність ухилів, мають вирішальний вплив на функціональність транспортної системи.

Основне обмеження звичайного приводу полягає у передачі тягової сили виключно через силу зчеплення коліс з рейками. На практиці, в шахтних умовах коефіцієнт зчеплення нестабільний та залежить від багатьох негативних факторів: вологості, пилу, мастила, нерівностей колії та вібрацій. При перевищенні граничного значення тягового зусилля виникає пробуксовка – явище, коли колеса обертаються швидше за рух самого електровозу. Це не тільки знижує ефективність, а й спричиняє знос бандажів коліс та поверхонь рейок, також може відбуватися розносне буксування, коли колеса обертаються на місці.

Вищезгадані проблеми зумовлені особливостями класичного приводу електровозів, що базується на використанні сили зчеплення коліс з рейками. Проте, привід на основі лінійних асинхронних двигунів позбавлений таких недоліків. У них передача тягової сили відбувається завдяки електромагнітній взаємодії індуктора та реактивного елемента, незалежно від умов зчеплення чи ухилів колії.

Необхідність функціонування в умовах значних ухилів колії може бути зумовлена різними факторами: застосовуваною схемою розробки родовища, технологією ведення гірничих робіт, гірничо-геологічними умовами, техніко-економічними розрахунками та іншими аспектами. Експлуатація електровозного транспорту при великих ухилах вимагає зменшення маси складів, що, в свою чергу, призводить до збільшення їх кількості. Як наслідок, зростають експлуатаційні витрати, знижується ефективність транспортної системи в цілому.

Сила тяги електровозів обмежується силою зчеплення:

$$F_{\text{ел.}} \leq F_{\text{зч}} = g \cdot P_{\text{зч}} \cdot \psi_{\text{кр}} \cdot 10^3, \quad (1.3.1)$$

де $F_{\text{ел.}}$ – сила тяги електровозу, Н;

$F_{\text{зч}}$ – сила зчеплення, Н;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$P_{зч}$ — маса зчіплення електровозу, т;

$\psi_{кр}$ — критичне значення коефіцієнту зчіплення.

Вплив коефіцієнта зчіплення та ухилу колії можна зобразити у вигляді логічної схеми, яку ілюструє рис. 1.3.1.

Взаємодія вказаних на рис. 1.3.1 факторів часто спричиняє ситуацію, коли навіть цілком справний та потужний тяговий двигун не може реалізувати розраховану силу тяги через обмеження, накладені зчепленням. Найбільш помітно це виявляється на ділянках з мінливим ухилом або на перехідних кривих, де профіль колії змінюється досить стрімко. Спроба форсувати рух може призвести до інтенсивного буксування та необхідності зменшувати навантаження або залучати додаткові технічні засоби.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20



Рисунок 1.3.1 Вплив коефіцієнта зчіплення та ухилу шляху на тягові характеристики

Поміж цього, слід усвідомлювати, що пробуксування не є просто втратою ефективності. Воно супроводжується збільшенням сили струму в ланцюзі тягового двигуна, що може призвести до його перегріву, спрацювання захисту та, як наслідок, тимчасової зупинки руху. Додатково, пробуксування призводить до прискореного зношування бандажів і руйнування голівки рейки, особливо при виникненні резонансних вібрацій.

В умовах глибоких шахт зі значними ухилами обмеження маси складу вимагає експлуатації більшої кількості електровозів з меншим завантаженням,

що збільшує витрати на обслуговування та енергоспоживання. Отже, ухил та зчеплення є двома взаємозалежними параметрами, що обмежують можливості традиційного приводу та зумовлюють необхідність застосування більш гнучких рішень.

1.4 Лінійні асинхронні двигуни: принцип дії, переваги і недоліки.

Сучасні інженерні виклики в області підземного транспорту все частіше спонукають до відмови від традиційного механізму передачі тягового зусилля через "колесо-рейку". Одним з перспективних рішень є лінійний асинхронний двигун (ЛАД) – електрична машина, у якій магнітне поле формується не за круговою, а за поступальною траєкторією. Це дозволяє передавати тягове зусилля безпосередньо через електромагнітну взаємодію між індуктором та вторинним елементом, без участі механічного контакту, як у традиційних приводах.

Конструктивно, ЛАД є розгорнутим уздовж лінії руху асинхронним двигуном. Замість статора і ротора, що обертається, використовується індуктор (первинний активний елемент), в якому формуються змінні магнітні поля, і реактивний (вторинний) елемент, закріплений вздовж шляху і виконує роль рейки. Електромагнітні сили, що виникають у процесі взаємодії між цими елементами, генерують тягу, яка переміщує індуктор вздовж вторинного тіла, тобто вздовж шахтного шляху.

Цей тип двигуна особливо привабливий в умовах, де зчеплення колеса з рейкою нестабільне або відсутнє. Це стосується шахт з великими ухілами, забрудненими коліями, ділянок з підвищеною вологістю, а також стартових та аварійних режимів руху.

Проте, незважаючи на унікальні переваги, використання ЛАД в шахтних електровозах пов'язане з певними технологічними та експлуатаційними викликами.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

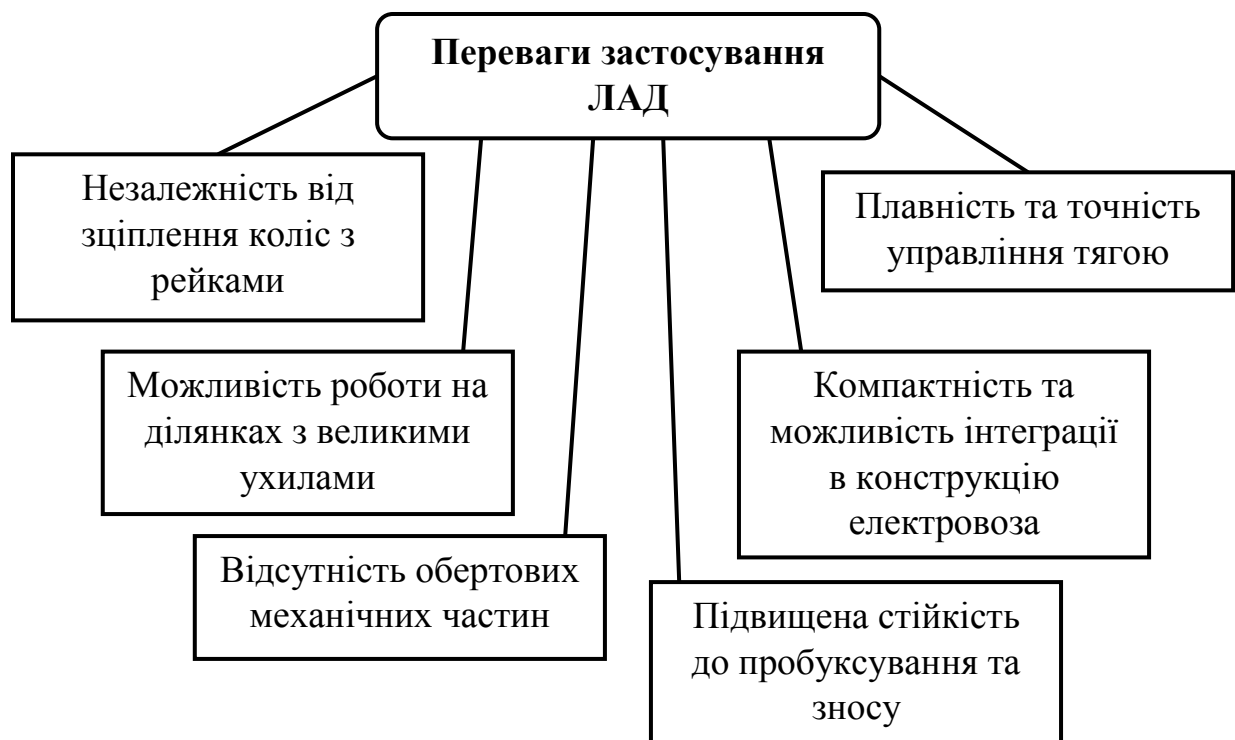


Рисунок 1.4.1. Переваги застосування лінійного асинхронного двигуна

Лінійний асинхронний двигун (ЛАД) забезпечує тягу через електромагнітну взаємодію, сила якої залежить від надійного зціплення коліс та рейок. Це надзвичайно важливо на гірничих схилах шахт, де традиційні приводи часто втрачають ефективність. Відсутність обертових компонентів, таких як вали, щітки чи колектори, знижує зношування та спрощує технічне обслуговування. Крім того, ЛАД дає змогу точно контролювати величину тяги, що є вирішальним при роботі зі змінним навантаженням, а також під час запуску, коли потрібний великий пусковий момент.

Одним з основних недоліків ЛАД є відносно низький коефіцієнт корисної дії, особливо при використанні живлення з промислової мережі. Ефективність значно покращується при застосуванні частот від 10 до 17 Гц, але це вимагає окремих інверторів, що ускладнює загальну схему. До того ж, тягове зусилля ЛАД зменшується експотенційно зі збільшенням відстані між первинною та вторинною частинами, що вимагає суворих вимог до монтажу та підтримки точності конструкції.



Рисунок 1.4.2. Недоліки застосування лінійного асинхронного двигуна

Наявність крайових ефектів (зокрема в однобічних конструкціях) зумовлює нерівномірний розподіл магнітного поля, що може викликати небажані моменти. До того ж, ЛАД висуває специфічні потреби до матеріалу вторинного елемента: він мусить володіти потрібною магнітною проникністю та електропровідністю, що підвищує ціну обладнання.

Потрібно також брати до уваги, що самостійне використання ЛАД як головного приводу наразі обмежене. Найчастіше він використовується як додатковий привод, котрий автоматично вмикається при пробуксовуванні або на похилих ділянках. Це потребує точного узгодження з основним приводом та окремого блоку управління.

З вищесказаного випливає, що найбільш раціональним виявляється використання комбінованого приводу, що поєднує традиційний основний привод та додатковий, виконаний на базі ЛАД. Через відмінності механічних

властивостей основного й додаткового тягових двигунів їх одночасне функціонування можливе виключно за умови узгодження режимів роботи обох приводів. Основний привод є головним, а допоміжний – підпорядкованим. Досягнення оптимальних робочих режимів можливе лише за умови врахування математичних залежностей між тяговими зусиллями зазначених приводів, а також забезпечення раціонального співвідношення між їх параметрами шляхом регулювання параметрів підпорядкованого приводу. Сукупність цих потреб складає основу концепції розробки комбінованого приводу рудного електровозу.

Додатковий привід виконує функцію генератора додаткової тяги, незалежно від взаємодії коліс електровозу з рейками, що дає змогу, з незмінною масою зчеплення електротягу, збільшити його тягове зусилля вище величини сили зчеплення, що визначається за формулою (1.3.1). Зважаючи на невисокі енергетичні характеристики лінійного електродвигуна, додаткове тягове зусилля застосовується виключно на окремих частинах колії зі схилом, що перевищує ухил опору, а також у ситуаціях, коли пробуксовка коліс електротягу виникає через зміну коефіцієнта зчеплення коліс електротягу з рейками. Фізичний зміст наведеного ілюструють схеми, що розміщені на рис. 1.4.3, де зображені сили, що діють на електровоз з традиційним приводом, і рис. 1.4.4, де ці сили прикладені до електровозу з комбінованим приводом.

Як бачимо з рисунків, під час використання комбінованого приводу сукупна сила, що діє на електровоз, здатна перевищувати значення сили зчеплення, обчислене за умовою (1.2.1). Це призводить до покращення тягових характеристик шахтного електровоза. Присутність додаткового магнітного притягання між індуктором лінійного двигуна (ЛД), змонтованим безпосередньо на електровозі, та вторинним елементом, встановленим на рейках, якщо останній виготовлений із феромагнітних матеріалів, додатково сприяє підвищенню сили тяги електровоза та зменшенню ковзання коліс через збільшення ваги зчеплення.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

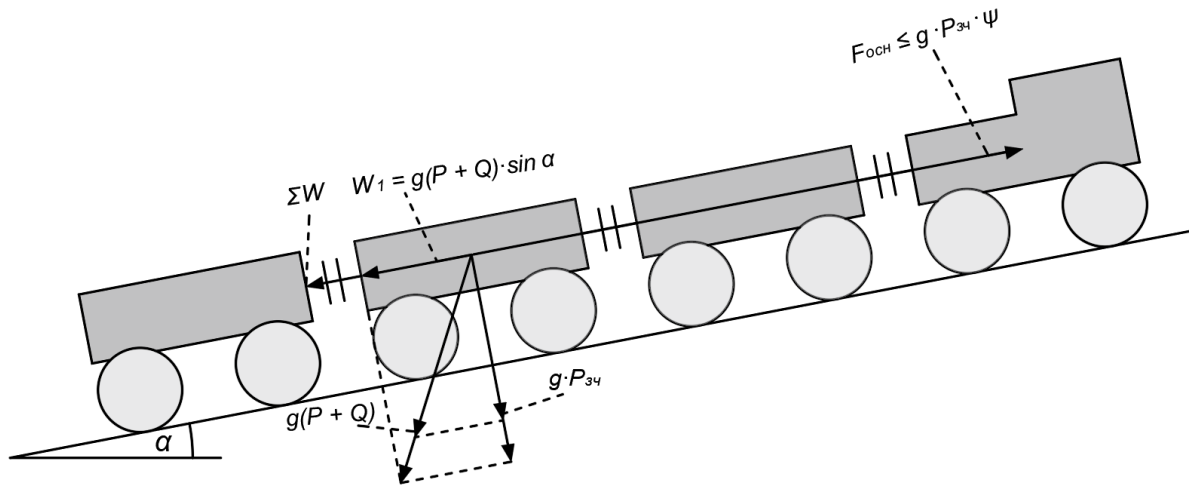


Рисунок 1.4.3. Сили, що прикладені до електровозу при традиційному приводі

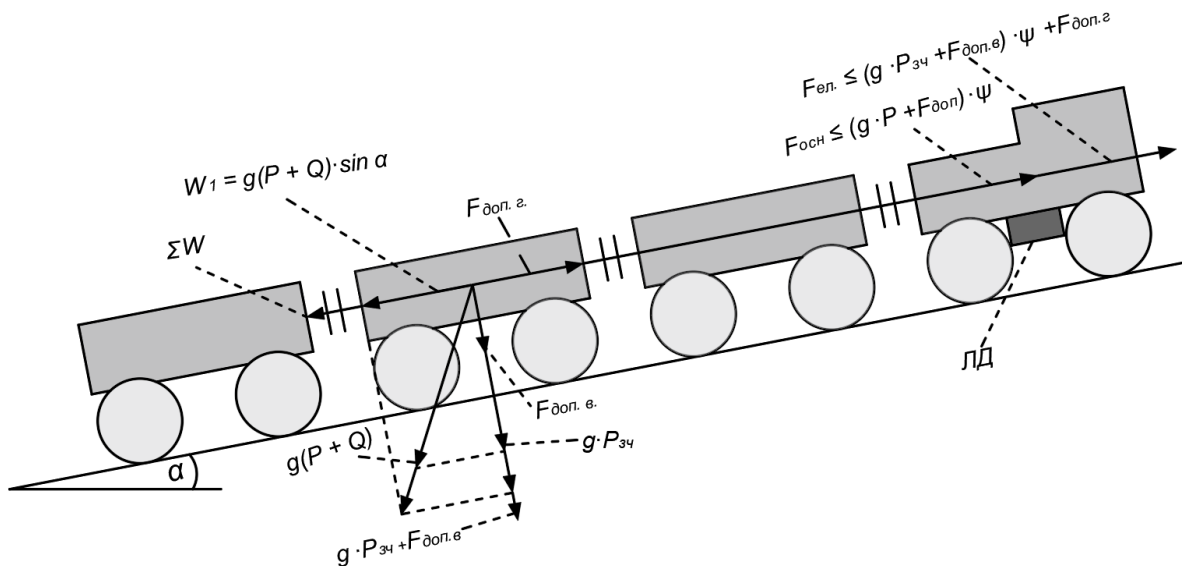


Рисунок 1.4.4. Сили, що прикладені до електровозу при комбінованому приводі

1.5 Аналіз наявних реалізацій комбінованих систем

Питання інтеграції лінійних асинхронних двигунів у транспортні мережі, включно з метрополітемом, стало об'єктом активних дискусій ще в другій половині минулого століття. На той час, найперші дослідження фокусувалися на потенціалі використання ЛАД у безконтактних тягових механізмах, де відсутня потреба в передачі тягового зусилля через взаємодію коліс та рейок. Спочатку ці розробки були сконцентровані на конкретних нішах, як-от підвісні дороги або монорейкові системи. З часом, було

виявлено, що переваги ЛАД можуть бути ефективно використані й у шахтному транспорті, особливо в комбінації з традиційними типами приводу.

Перші практичні спроби використання лінійних асинхронних двигунів у підземному транспорті пов'язані з конвеєрними потягами. Зокрема, в Радянському Союзі розробили вибухобезпечні серії лінійних двигунів, наприклад, серія ДАЛ. Вони були призначені для переміщення вагонеток за визначеним маршрутом, підтримуючи як сталу, так і змінну швидкість. Ці двигуни довели свою ефективність при низьких швидкостях та в умовах високої вологості і запиленості. Основна їхня перевага полягала у простоті конструкції: лінійний двигун розташовувався вздовж колії, а індуктор - на рухомій частині, що гарантувало надійну тягу навіть у випадку, коли зціплення коліс з рейками порушувалось.

З часом інтерес до застосування ЛАД в шахтних електровозах змістився у бік комбінованих приводів. Це пов'язано з тим, що повністю замінити традиційний тяговий привід на ЛАД було визнано недоцільним через численні фактори, наприклад, низький коефіцієнт корисної дії на малих швидкостях та значну залежність від зазору між індуктором та вторинним тілом. Натомість, інженери дійшли до ідеї використання ЛАД як додаткового або допоміжного приводу, котрий активується тільки за певних умов, таких як втрата зчеплення, значний підйом ухилу чи старт з місця при перевантаженні.

Для забезпечення злагодженої роботи двох приводів необхідний блок узгодження. Він контролює активацію та деактивацію ЛАД в залежності від поточного режиму руху, враховуючи показники швидкості, сили струму тягових двигунів, коефіцієнта зціплення, пробуксовування та ухилу колії. Більшість досліджених конструкцій базуються на принципі, згідно з яким ЛАД вимкнений при стандартному зчепленні і активується тільки при порушенні тягової рівноваги. Це дозволяє значно скоротити споживання електроенергії та знос деталей ЛАД.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Подібні комбіновані схеми успішно застосовувалися на експериментальних зразках електровозів та платформах для перевезень. Наприклад, в конструкції міського монорейкового транспорту, розробленого на Київському заводі електротранспорту, використовувалися лінійні двигуни, які вирізнялися покращеними енергетичними характеристиками. Експлуатація засвідчила, що ЛАД дозволяють без проблем долати ухили в 10–12%, де традиційний привід вже не справляється. Водночас, точне управління та контроль максимального струму забезпечували високу надійність та безпеку експлуатації.

До того ж, зарубіжний досвід у рудному транспорті, зокрема у Німеччині й Китаї, засвідчує зростаючий інтерес до гібридних тягових систем. Деякі з новітніх шахтних платформ обладнуються як класичними редукторними приводами, так і лінійними асинхронними двигунами, що живляться від інверторів з частотною модуляцією. Хоча такі системи наразі не здобули масового розповсюдження через ціну та технічну складність, вони активно вивчаються в межах проектів автоматизації підземного транспорту.

Аналіз доступних технічних розробок засвідчує, що комбіновані приводи на основі ЛАД виглядають як багатообіцяючий напрям еволюції шахтного транспорту. Використання таких приводів дає змогу частково або повністю нівелювати обмеження, що обумовлені умовами зчеплення, та ефективно долати геометричні й силові перешкоди, які виникають під час роботи електровозів на складних відрізках шахтних шляхів. Подальший прогрес у розвитку цих систем тісно пов'язаний, насамперед, з покращенням енергетичних показників ЛАД, зменшенням їхньої ціни та впровадженням досконаліших систем керування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2.

РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ

КОМБІНОВАНОГО ПРИВОДУ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	дата									
Розроб.		Афанасенков В.В			Розділ 2					Лім.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Сінчук І.О										29	10
										КНУ ЕЕМ-21-2			
Н. Контр.		Сінчук І.О											
Затверд.		Пересунько І.І.											

2.1 Теоретичні основи застосування ЛАД у комбінованому приводі

Традиційна тягова система рудникового електровоза використовує передачу тяги через механічну взаємодію: від електродвигуна до колісної пари, а вже звідти – через контакт коліс з рейками – до колії. Цей спосіб показує високу ефективність, коли коефіцієнт зчеплення стабільний, але втрачає свої переваги в ситуаціях пробуксовки, на підйомах та при динамічних впливах. В цих випадках виникає потреба у додатковій складовій тяги, що не залежить від зціплення коліс з рейками. Функцію такого елемента здатний виконувати лінійний асинхронний двигун, що діє на основі електромагнітної взаємодії з нерухомим вторинним елементом, закріпленим вздовж колії.

ЛАД, закріплений на рухомій частині електровозу, генерує поступальне магнітне поле. Воно, в свою чергу, індукуює струми у реактивному елементі, що знаходиться вздовж залізничної колії (так званий «третій рейці»). Електромагнітна взаємодія, яка при цьому виникає, формує силу, орієнтовану вздовж осі пересування, що надає додаткову тягу, не покладаючись на контактне зчеплення. Такий підхід радикально відрізняється від традиційного приводу, роблячи ЛАД незамінним при ускладненому зціпленні або на крутих підйомах.

Використання ЛАД як додаткового механізму, а не головного, обумовлено його енергетичними особливостями. На низьких швидкостях пересування, які типові для підземного транспорту, ЛАД мають зменшений ККД, особливо при живленні від джерел промислової частоти (50 Гц). Це пояснюється тим, що у режимі часткового ковзання і мінімальної синхронної швидкості лінійний двигун втрачає ефективність через слабку реакцію вторинного елемента. Проте, якщо застосовувати ЛАД обмежено – лише у ті моменти, коли тягова сила основного приводу виявляється недостатньою, – можна досягти необхідного підсилення без значних втрат.

З фізичної точки зору, ЛАД діє як адаптивний компенсатор пробуксовування коліс. Силу тяги можна точно коригувати, змінюючи

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частоту та амплітуду напруги живлення, яке надходить з автономного інвертора. Це дозволяє впроваджувати алгоритми автоматичного ввімкнення лінійного асинхронного двигуна на основі поточного режиму руху: коли швидкість потяга знижується до рівня нижчого від заданого, а струми головних тягових двигунів досягають граничних показників, блок узгодження ініціює активацію ЛАД.

Ключовим аспектом у створенні подібної системи є синхронізація режимів роботи головного та допоміжного приводів. Оскільки ЛАД і звичайний двигун демонструють відмінні електромеханічні властивості (зокрема, різні залежності тяги від швидкості), їхнє сумісне функціонування потребує ретельної координації. Цього досягають за допомогою спеціального блоку узгодження, який відстежує робочі параметри обох систем та генерує керуючі сигнали для інвертора лінійного асинхронного двигуна, щоб не порушувати тягову рівновагу складу й уникати конфліктів між джерелами тяги.

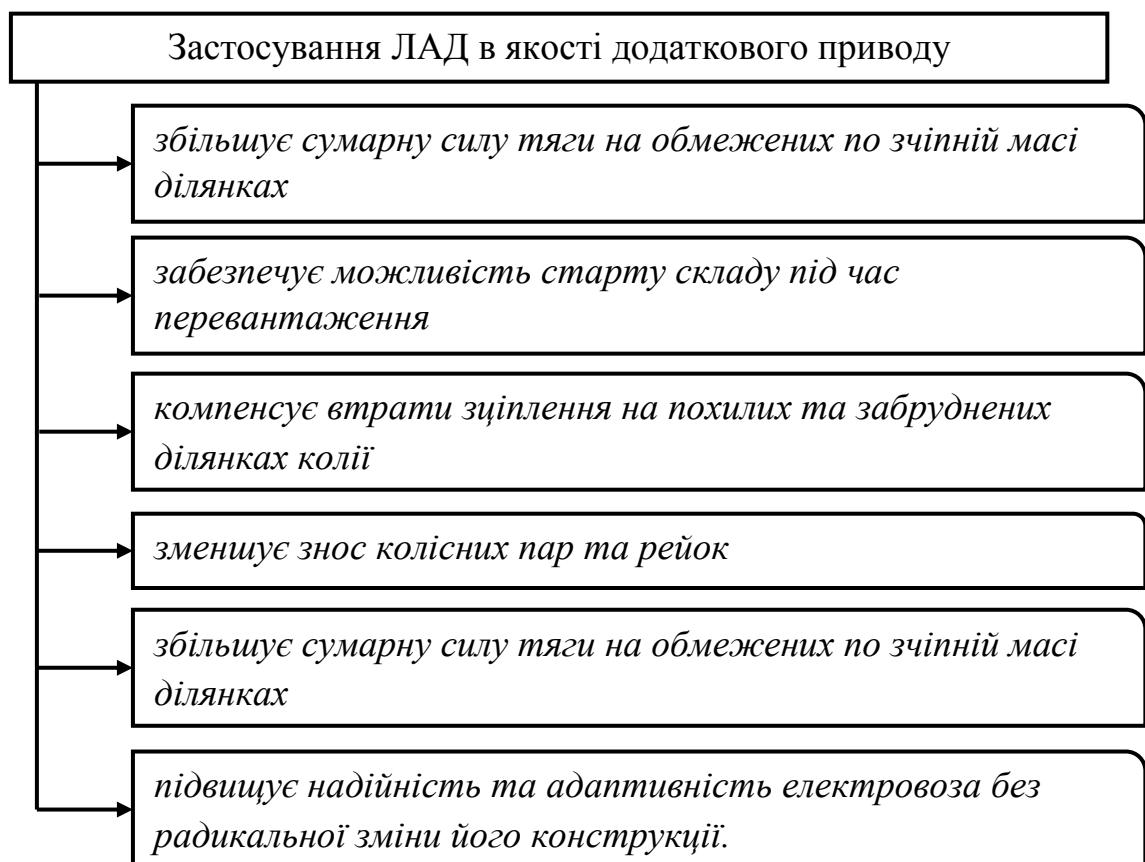


Рисунок 2.1.1. Можливості ЛАД в якості додаткового приводу

2.2 Функціональна схема комбінованого приводу

Функціональна схема автоматизованого комбінованого приводу шахтного електровоза ілюструє взаємодію двох джерел тяги – основного традиційного приводу та додаткового, побудованого на основі лінійного асинхронного двигуна, узгоджених за допомогою блоку управління. Її зображено на рис. 2.2.1, і вона включає такі складові:

Основний привід, що складається з:

- колісних пар K_1 та K_2 ;
- тягових двигунів постійного струму D_1 та D_2 ;
- перетворювача сигналів управління (залежно від реалізації: контролер, широтно-імпульсний перетворювач або тиристорний перетворювач на підстанції) P_1 ;
- системи автоматичного керування $САК_1$.

Додатковий привод, до складу якого входять:

- лінійний електродвигун ЛД;
- автономний інвертор P_2 ;
- система керування $САК_2$;
- блок узгодження БУ;
- шахтний потяг П, що являється загальним навантаженням приводів.

Діючим впливом для всієї системи є сигнал завдання швидкості потяга $V_{пз}$.

Перешкоджаючими сигналами, що впливають на роботу приводу, є:

- опір руху потяга ΣW ;
- зміна коефіцієнта зчіплення колісних пар $\Delta\psi_1, \Delta\psi_2$;
- зміна повітряного зазору між індуктором ЛД та третьою рейкою $\Delta\delta$.

Система керування основним приводом формує сигнал керування u_1 як функцію струмів тягових двигунів I_{a1}, I_{a2} та швидкостей колісних пар $V_{к1}, V_{к2}$. Цей сигнал u_1 трансформується у відповідну зміну напруги живлення U_a або опору якірного ланцюга тягових двигунів R_a , результатом чого є зміна

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

сил тяги тягових двигунів $F_{д1}$ і $F_{д2}$, прикладених до колісних пар, що призводить до зміни сил зчіплення $F_{зч1}$ та $F_{зч2}$, що приводять потяг у рух.

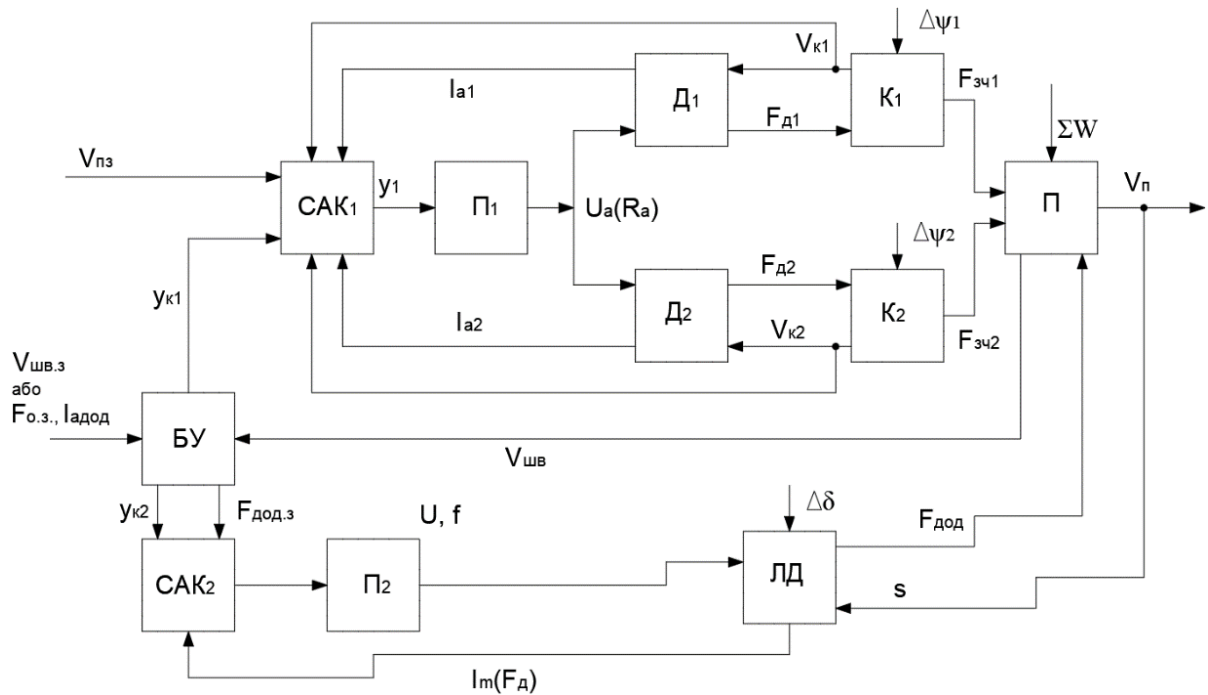


Рисунок 2.2.1. Функціональна схема автоматизованого комбінованого приводу шахтного електровоза

Система автоматичного керування САК₂ забезпечує безпосереднє керування тяговою силою лінійного електродвигуна. Це нагадує системи прямого управління крутним моментом, що застосовуються в традиційних асинхронних двигунах. Керуючі впливи y_2 формуються так, щоб додаткова тягова сила $F_{дод}$ прагнула досягти заданої величини $F_{дод.з}$, враховуючи змінну швидкість потяга $V_{п}$, а відтак, змінне ковзання s . Окрім того, передбачено захист від перевантаження, що вимикає ЛД у випадку перевищення максимально допустимого значення ефективного струму I_m .

Блок узгодження забезпечує включення ЛД та формує сигнал завдання швидкості $F_{дод.з}$ в функції сигналів датчиків струму тягових двигунів основного приводу I_{a1} та I_{a2} , датчика швидкості потягу $V_{п}$ і датчиків швидкостей колісних пар $V_{к1}$ і $V_{к2}$.

Умовою ввімкнення додаткового приводу є наявність тривалого буксування коліс електровоза, оскільки в інших випадках можливе ввімкнення приводу під час випадкових коливань швидкостей прослизання

та робочих струмів тягових двигунів. Стійке буксування визначається, коли: або швидкість потяга знижується на понад 15% відносно заданої, або робочий струм одного з тягових двигунів перевищує граничне значення, що вказане в технічній документації.

Важливою характеристикою такої конструкції є автоматичне управління: допоміжний привід включається та налаштовується без участі машиніста, забезпечуючи адаптацію до складних дорожніх умов та підвищуючи стійкість системи при буксуванні або перевантаженні.

З погляду управління, схема реалізує замкнену структуру зі зворотним зв'язком, де сигнал заданої швидкості потягу порівнюється з фактичними параметрами руху. У разі виникнення розбіжності, викликаній пробуксуванням чи перевантаженням, система автоматично задіює додатковий привід та регулює його функціонування до стабілізації режиму.

З вищесказаного випливає, що функціональна схема комбінованого приводу демонструє високий рівень інтеграції та автоматизації, поєднуючи переваги двох тягових систем, різних за принципом дії. Ця схема забезпечує стабільну роботу електровоза в умовах великих ухилів колії, нестабільного зчеплення та змінних навантажень. Вона також дозволяє ефективно використовувати ЛАД лише за потреби, зменшуючи втрати та продовжуючи термін служби обладнання.

2.3 Структурна схема комбінованого приводу

Структурна схема автоматизованого комбінованого приводу рудного електровоза показана на рис. 2.3.1. Вона детально описує компоненти системи, їх логічні зв'язки та взаємодію. Ця схема дозволяє зрозуміти, як здійснюється керування рухом рудникового електровоза за наявності основного та додаткового тягового приводу, які працюють узгоджено.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- датчики фазного струму $ДС_a$, $ДС_b$, $ДС_c$, що використовуються для реалізації в інверторі джерела струму;
- вимикач В2;
- датчик потребуючого додатковим приводом струму ДСД;
- система керування додатковим приводом СКдп, що формує керуючий вплив на інвертор з метою забезпечення заданого значення додаткової сили тяги.

Оскільки основний та додатковий приводи мають відмінні електромеханічні характеристики, для їхньої правильної взаємодії потрібен спеціальний блок узгодження. Цей блок формує команди для системи керування допоміжним приводом, пристосовуючи їх до актуального режиму роботи основного приводу. Таким чином, регулювання роботи додаткового приводу відбувається автоматично, що зменшує потребу у прямому втручанні машиніста електровоза.

Блок узгодження формує керуючий сигнал для системи управління допоміжним приводом, забезпечуючи корегування його тягової потужності згідно зі значенням струму основного приводу та показником проковзування коліс електровоза. У блоці узгодження також враховуються зовнішні чинники, а саме: відхилення фактичної маси вантажу потягу та середнього значення коефіцієнта зчеплення від запланованих величин, а також зміни опору руху потяга. Низькошвидкісні двигуни з феромагнітними та складними роторами знайшли широке застосування на конвеєрних лініях та у міському монорейковому транспорті.

Для тихохідних лінійних асинхронних електродвигунів із шихтованим індуктором найкращі показники енергетичної ефективності досягаються при застосуванні складних феромагнітних вторинних елементів, де товщина шару струмопровідного матеріалу (мідь або алюміній) в накладці не перевищує 1,5–3 мм. Наступне збільшення провідного шару не призводить до значного покращення енергетичних характеристик, натомість значно збільшує вартість пристрою.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Залежність тягової сили індуктора низькошвидкісних лінійних двигунів, оснащених феромагнітним модульним вторинним елементом, може бути виражена експотенційною функцією стосовно величини повітряного зазору. Для забезпечення прийнятної ефективності необхідно підтримувати повітряний зазор у межах від 0,5 до 20 мм.

Навантажувальна характеристика для даного типу лінійних двигунів має практично лінійний вигляд, що дозволяє використовувати лінійний асинхронний двигун як кероване джерело тягової сили. Частотно-струмові системи управління ЛД, які отримують живлення від контрольованих інверторів, знайшли широке застосування у приводі конвеєрних систем, гарантуючи рух з швидкостями у діапазоні від 0,2 до 11,5 м/с при частоті живлення до 20 Гц. При цьому оптимальні енергетичні показники досягаються в діапазоні частот 10 – 17 Гц.

2.4 Умови включення ЛАД у роботу

Ефективна робота комбінованого приводу рудного електровозу можлива за умови, коли додатковий ЛАД залучається до роботи лише тоді, коли тягового зусилля основного приводу недостатньо для підтримання сталої швидкості складу. З огляду на те, що ЛАД має меншу енергетичну ефективність та демонструє підвищену чутливість до умов експлуатації, його активація має бути суворо контрольованою та здійснюватися в автоматичному режимі, ґрунтуючись на аналізі актуальних параметрів руху.

За основу алгоритму ввімкнення ЛАД береться аналіз стабільності руху, що виконується в блоці узгодження. Система постійно контролює низку діагностичних параметрів, порівнюючи їх із встановленими нормами. У випадку виявлення відхилень, формується сигнал активації, який передається до системи управління лінійним асинхронним двигуном.

Після спрацювання ЛАД блок узгодження генерує сигнал для створення додаткової сили тяги ($F_{\text{дод}}$), який спрямовується до системи керування додатковим приводом. Система керування ЛАД керує роботою автономного інвертора, забезпечуючи електромагнітну тягу, враховуючи

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поточну швидкість руху та ковзання. Управління базується на принципі прямого регулювання тяги, що дає змогу точно підтримувати задане значення, незалежно від змін швидкості або величини зазору між індуктором і струмоприймачем.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3.

РОЗРАХУНОК РАЦІОНАЛЬНИХ

ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО

ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Афанасенков В.В			Розділ 3			
<i>Перевір.</i>		Сінчук І.О						
<i>Н. Контр.</i>		Сінчук І.О						
<i>Затверд.</i>		Пересунько І.І.						
					<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>	
							39	15
					КНУ ЕЕМ-21-2			

3.1 Алгоритм розрахунку раціональних параметрів комбінованого приводу

Тепловий розрахунок основного приводу повинен вироблятися за методом еквівалентних струмів. Еквівалентний струм двигуна визначається з даного виразу:

$$I_{\text{еф.мах}}^{\text{осн}} = \sqrt{\frac{\int_0^{T_{\text{дв}}} I^2(t) dt}{T_{\text{дв}} + \Theta}} \leq I_{\text{тр}}^{\text{осн}}, \quad (3.1.1)$$

де $I_{\text{еф.мах}}^{\text{осн}}$ – максимально допустиме значення ефективного струму тягових двигунів, А; $T_{\text{дв}}$ – час руху, хв; Θ – час паузи в циклі руху, хв; $I(t)$ – миттєвий струм тягових двигунів в момент часу t , А; $I_{\text{тр}}^{\text{осн}}$ – максимальне значення ефективного струму тягових двигунів, допустиме по умові нагріву тягових двигунів, що приймається рівним тривалому струму, А.

Опір руху різний на різних частинах колії, з чого випливає, що співвідношення сили тяги основного і додаткового приводів також повинне бути різним. В інакшому випадку сила тяги і час роботи, а також потужність додаткового приводу значно зростають. Окрім того, на деяких ділянках колії, наприклад на кривих, використання додаткового приводу проблематичне, що також потрібно взяти до уваги. З цього випливає, що потужність додаткового приводу повинна бути як можна меншою, з іншої сторони, еквівалентний струм тягових двигунів не повинен перевищувати тривалий струм, що приводиться в паспортних даних тягового двигуна. При рівності ефективного струму тривалому значенню маємо повне використання можливостей основного приводу при найменшій розрахунковій потужності додаткового рушія (ЛД).

Якщо розбити діаграму навантаження приводу на j ділянок, на яких сумарний опір руху можна рахувати незмінним і рівним w_j , то можна окреслити співвідношення сили тяги додаткового та основного приводів на j -тій ділянці:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\xi_j = \frac{F_{\text{дод}j}}{F_{\text{осн}j}}, \quad (3.1.2)$$

де $F_{\text{дод}j}$ і $F_{\text{осн}j}$ – відповідно сили тяги додаткового і основного приводів на j -ій ділянці.

З урахуванням того, що при відсутності системи автоматизованого диспетчерського керування рухом складів і системи найбільша кількість пусків дорівнює $n = c + 2$, де c – кількість стрілочних переводів, то для еквівалентного струму основного приводу можна записати:

$$I_{\text{ед}}^{\text{осн}} = \sqrt{\frac{n \cdot I_{\text{г}}^{\text{осн}2} \cdot T_{\text{п.ван}} + \sum_{i=1}^m I_{\text{і.ван}}^{\text{осн}2} \cdot t_{\text{і.ван}}^{\text{осн}} + \sum_{j=1}^{k-m} I_{\text{і.ван}}^{\text{осн}2} \cdot t_{\text{і.ван}}^{\text{осн}} + n \cdot I_{\text{г}}^{\text{осн}2} \cdot T_{\text{п.пор}} + \sum_{i=1}^m I_{\text{і.пор}}^{\text{осн}2} \cdot t_{\text{і.пор}}^{\text{осн}} + \sum_{j=1}^{k-m} I_{\text{і.пор}}^{\text{осн}2} \cdot t_{\text{і.пор}}^{\text{осн}}}{T_{\text{р}} + \Theta}}, \quad I_{\text{сф}}^{\text{осн}} \leq I_{\text{тр}}^{\text{осн}} \quad (3.1.3)$$

де n – кількість пусків за час рейсу; $I_{\text{г}}^{\text{осн}}$ – часовий струм основного приводу, А; $T_{\text{п.ван}}$ і $T_{\text{п.пор}}$ – час розгону навантаженого і порожнього потягу відповідно, хв; m – кількість ділянок діаграми руху, на яких працює додатковий рушій не працює; k – кількість ділянок діаграми руху; $I_{\text{і.ван}}$, $I_{\text{і.пор}}$ – струм основного приводу на i -тій ділянці на якій додатковий привод не працює, при навантаженому і порожньому складі, А; $t_{\text{і.ван}}^{\text{осн}}$, $t_{\text{і.пор}}^{\text{осн}}$ – час руху на i -тій ділянці, хв; $I_{\text{і.ван}}$, $I_{\text{і.пор}}$ – струм основного приводу на j -тій ділянці на якому на якій не працює додатковий привод, при навантаженому і порожньому складі, А; $t_{\text{і.ван}}^{\text{осн}}$, $t_{\text{і.пор}}^{\text{осн}}$ – час руху на j -тій ділянці, хв; $T_{\text{р}}$ – час рейсу, хв; Θ – час маневрів.

Для еквівалентного струму додаткового двигуна з врахуванням (3.1.3) можна записати:

$$I_{\text{ед}}^{\text{осн}} = \sqrt{\frac{n \cdot I_{\text{п.ван}}^{\text{дод}2} \cdot T_{\text{п.ван}} + \sum_{j=1}^{k-m} I_{\text{і.ван}}^{\text{дод}2} \cdot t_{\text{і.ван}}^{\text{дод}} + n \cdot I_{\text{п.пор}}^{\text{дод}2} \cdot T_{\text{п.пор}} + \sum_{j=1}^{k-m} I_{\text{і.пор}}^{\text{дод}2} \cdot t_{\text{і.пор}}^{\text{дод}}}{T_{\text{р}} + \Theta}}, \quad (3.1.4)$$

де $I_{п.ван}^{дод}, I_{п.пор}^{дод}$ – струм додаткового приводу при пуску, для навантаженого і порожнього складу; $I_{j.ван}^{дод}, I_{j.пор}^{дод}$ – струм додаткового приводу на j-тій ділянці, А; $t_{п.ван}^{дод}, t_{п.пор}^{дод}$ – час роботи додаткового приводу на j-тій ділянці.

Так як співвідношення сил тяги основного і додаткового приводу при пуску рівне $\xi_n = 0,25 - 0,45$ для неперервної зміни тягового зусилля основного приводу при пуску і $\xi_{ст} = 0,35 - 0,55$ при ступінчатому, то співвідношення струмів при пуску може бути показане як:

$$\mu_n = \frac{I_n^{дод}}{I_{осп}^{дод}}. \quad (3.1.5)$$

Співвідношення сили тяги основного і додаткового приводу на j-тій ділянці позначається як:

$$\mu_j = \frac{I_j^{дод}}{I_{осп}^{дод}}. \quad (3.1.6)$$

Співвідношення часу роботи додаткового приводу до загального часу руху на j-тій ділянці:

$$\tau_j = \frac{t_j^{дод}}{t_j^{осп}}. \quad (3.1.7)$$

Ціль визначення вказаних вище функцій, а також керування $\mu_j = \mu(W_j)$ та $\tau_j = \tau(W_j)$ може бути вирішена методами теорії керування, з врахуванням $\mu_n = \mu(W_n)$. З врахуванням викладеного вище алгоритм розрахунку має вигляд як на рис. 3.1.1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

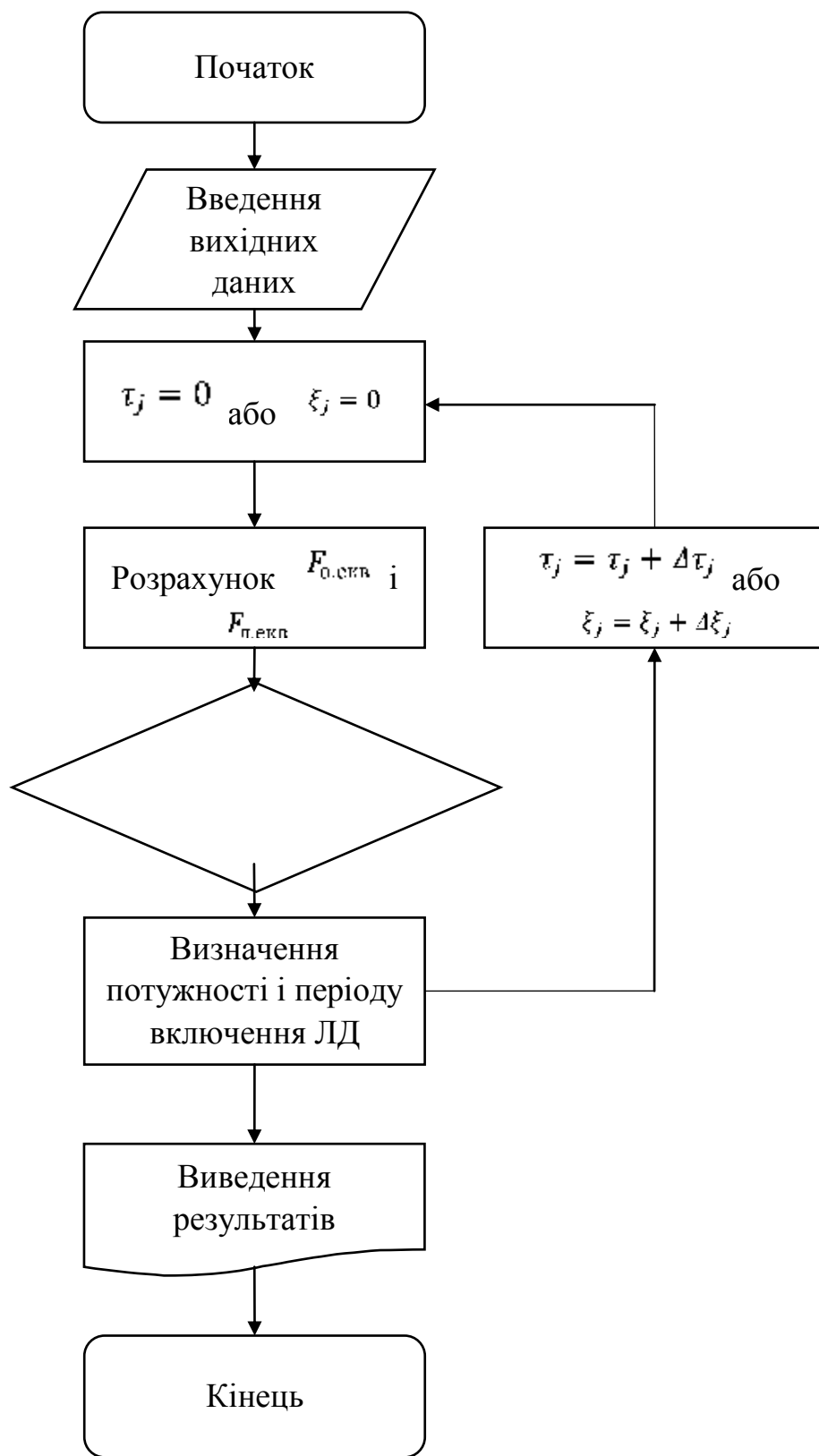


Рисунок 3.1.1. Блок-схема алгоритму визначення раціональної величини потужності додаткового рушія комбінованого приводу рудникового електровозу

Порядок обчислення наступний:

1. Визначення розрахункових значень опору руху рудникового потягу на кожному з ділянок діаграми;
2. Визначення розрахункової сили тяги і струму тягових двигунів основного приводу і нагрів тягових двигунів (у випадку, якщо додатковий привод працює тільки при розгоні потягу і відключений при сталому руху);
3. Визначення розрахункової сили тяги струму ЛД при роботі останнього тільки під час розгону потягу за формулою (3.1.1);
4. Визначення значень еквівалентного струму основного і додаткового приводів з врахуванням, що $\mu_j = 0$ і $\tau_j = t_j$;
5. Далі, при виконанні умови $I_{\text{еф}}^{\text{осн}} \leq I_{\text{тр}}^{\text{осн}}$ можна визначити потужність основного приводу, знаючи його еквівалентний струм;
6. У разі невиконання умови 5 приймаємо $\mu_j = \mu_j + \Delta\mu$, де $\Delta\mu$ – деякий крок, і повторюємо пункти 2-5 до тих пір, поки умова 5 не буде виконана;
7. Остаточного приймається те значення μ_j , при якому буде виконана умова $I_{\text{еф}}^{\text{осн}} \leq I_{\text{тр}}^{\text{осн}}$.

3.2 Дослідження впливу експлуатаційних факторів на раціональні параметри комбінованого електроприводу

В якості базового варіанту при розрахунку були прийняті наступні вихідні дані: електровоз типу К10, вагонетки ВГ-4, потік вантажу – 1500 т/змінa, довжина відкатки – 1500 м, середній ухил колії – 4,5 ‰, тип ЛД – лінійний асинхронний двигун з феромагнітним вторинним тілом.

Співвідношення пускової сили тяги ЛД і часової сили тяги основного приводу $\xi_{\text{п}} = \frac{F_{\text{дп}}}{F_{\text{оч}}} = \frac{8,9}{19} = 0,47$. В тривалому режимі – $\xi_{\text{тр}} = \frac{F_{\text{дп}}}{F_{\text{оч}}} = \frac{2,9}{9,5} = 0,3$.

Розрахункова потужність додаткового приводу рівна $P_{\text{дод}} = 43,2$ кВт, що складає 48% від потужності основного двигуна.

Залежність від довжини відкатки раціональної відносної потужності ЛД і відповідного їх економічного ефекту приведена на рис. 3.2.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

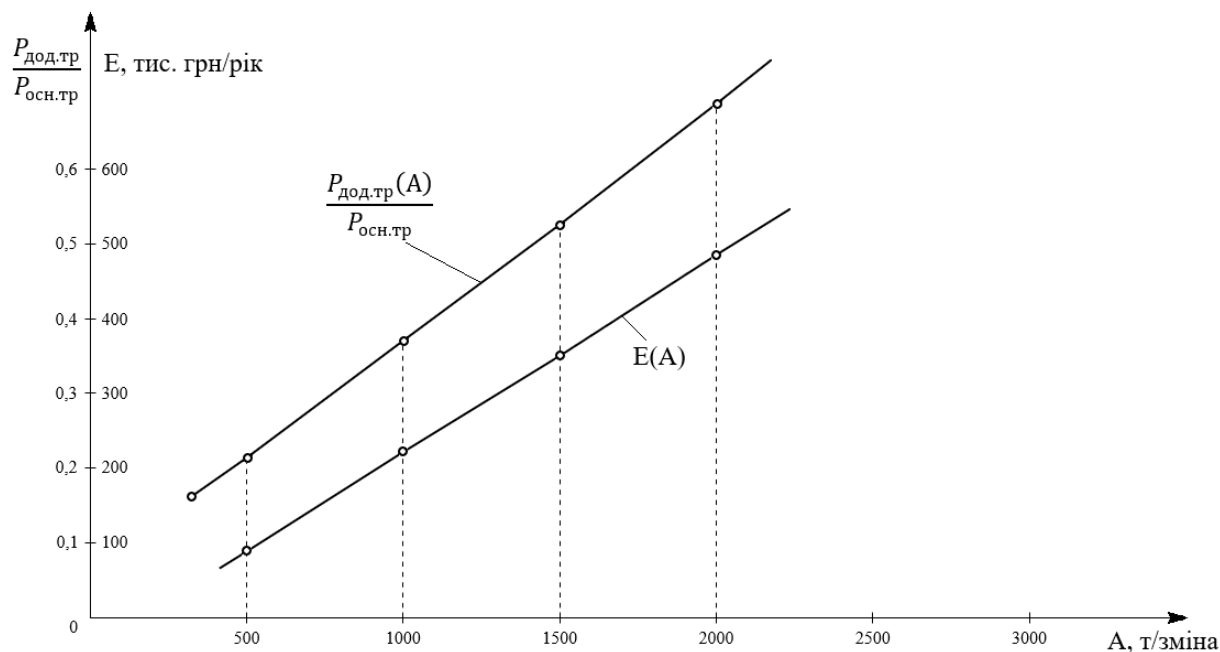


Рисунок 3.2.1. Залежність раціонального значення потужності додаткового приводу і ефективності його використання від потоку вантажу

Як можна бачити з рис. 3.2.1, раціональна відносна потужність ЛД і ефективність його використання практично лінійно зростають при збільшенні потоку вантажу, при чому вплив значний. Таким чином, при малих відстанях відкатки використання ЛД з великою потужністю не виправдане, і при збільшенні потоку вантажу від 500 до 1500 т/зміна раціональна потужність ЛД підвищується в 2,5 рази, а економічна ефективність – більш ніж в 3 рази.

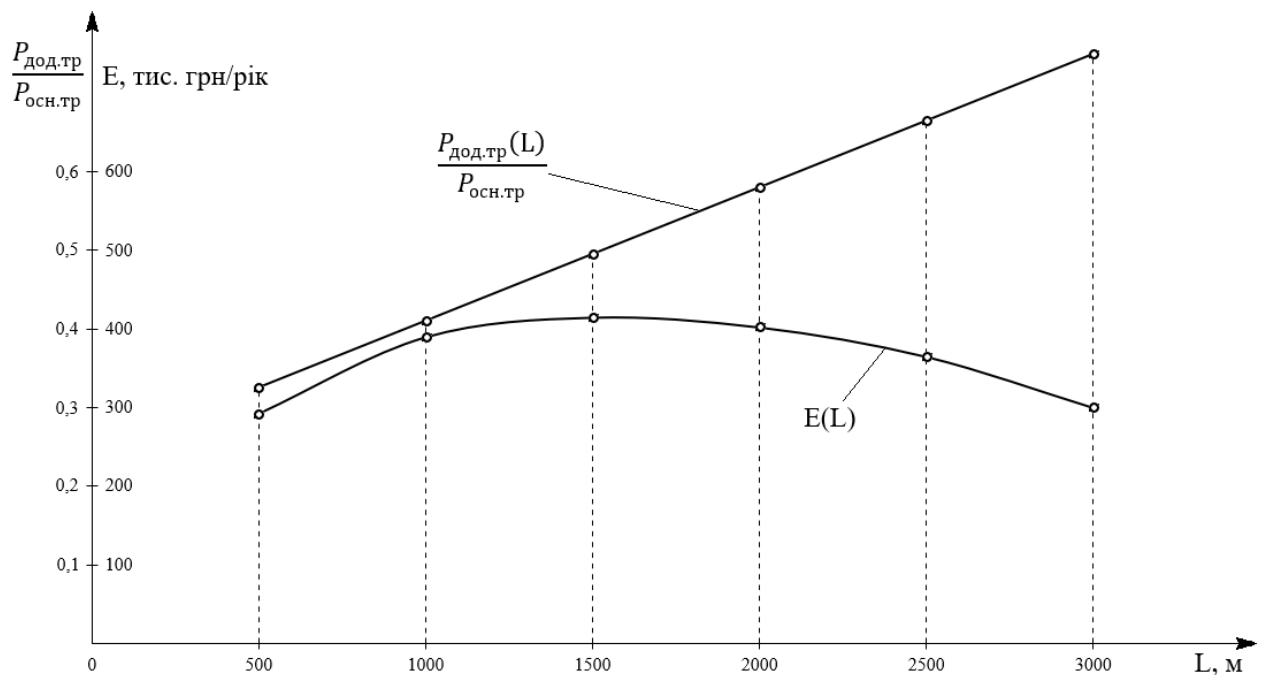


Рисунок 3.2.2. Залежність раціонального значення потужності додаткового приводу і ефективності його використання від довжини транспортування

Залежність раціональної потужності ЛД і економічного ефекту від довжини відкатки приведена на рис. 3.2.2. Як можна бачити з приведених вище графіків раціональна величина потужності додаткового приводу в значній мірі залежить від довжини транспортування, лінійно зростаючи від 0,35 до 0,65 при збільшенні довжини відкатки від 500 до 3000 м. При цьому, економічна ефективність від використання ЛД практично не залежить від довжини транспортування, змінюючись не більш ніж на 25% при найменшому (500 м) і найбільшому (1500 м) значенні довжини відкатки і залишається приблизно рівною 325-425 тисяч грн/рік.

Залежність раціональної потужності ЛД і економічного ефекту від ухилу колії відкатки приведена на рис. 3.2.3.

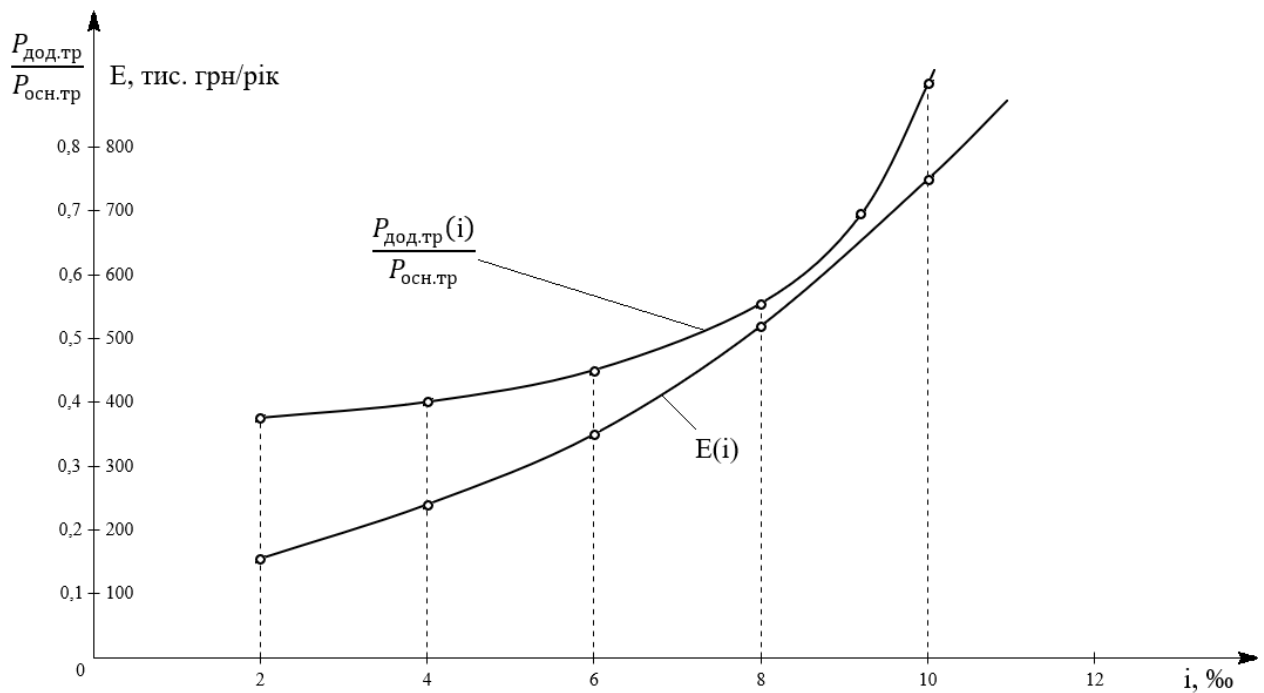


Рисунок 3.2.3. Залежність раціонального значення потужності додаткового приводу і ефективності його використання від ухилу колії

З рис. 3.2.3 випливає, що раціональна величина потужності додаткового приводу і ефективність від його використання різко збільшується зі збільшенням ухилів колії, що обумовлено необхідністю забезпечення розгону потягу при найгірших умовах, що обмежують можливу масу складу за відсутності додаткового приводу. Розрахунки за наданими вище методиками показують, що при подальшому підвищенні ухилів колії до 20 ‰ чи більше – потужність додаткового приводу перевищує потужність основного. Це говорить про перевагу використання лінійного приводу в подібних умовах.

Залежність раціональної потужності ЛД і економічного ефекту від середньої швидкості руху потягів на рис. 3.2.4.

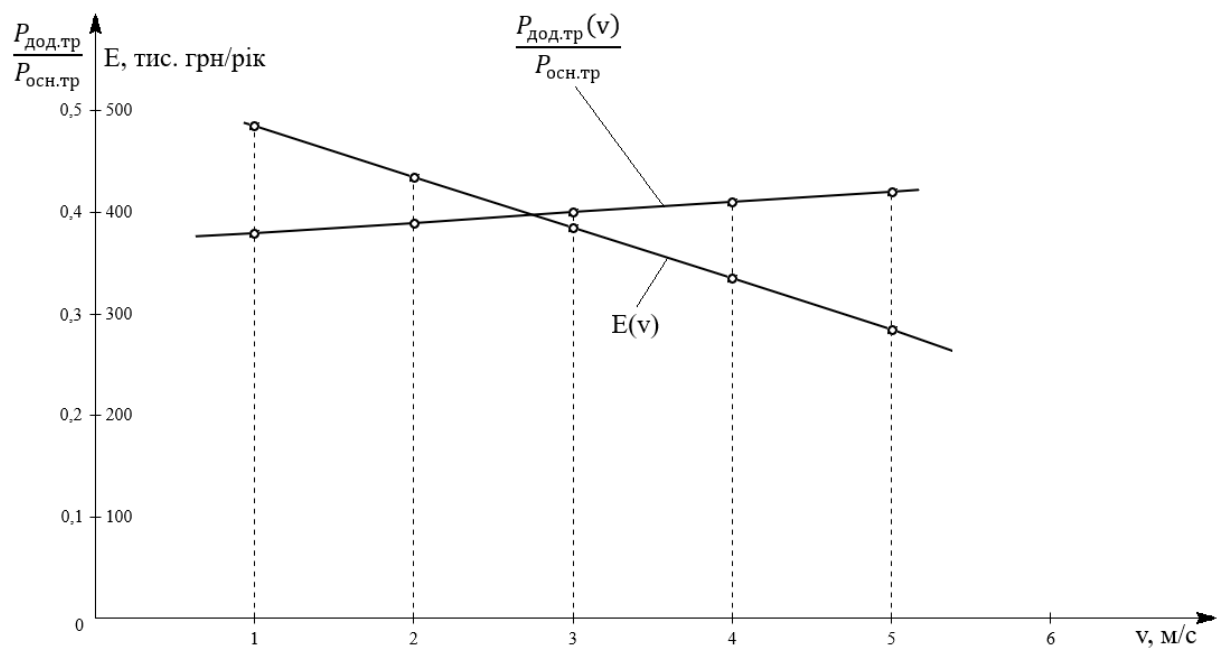


Рисунок 3.2.4. Залежність раціонального значення потужності додаткового приводу і ефективності його використання від середньої швидкості руху

З графіків, приведених на рис. 3.2.4, видно, що з підвищенням швидкості руху раціональна потужність додаткового приводу зростає, а ефективність зменшується. Проте, вплив швидкості на вказані параметри незначний (при збільшенні швидкості від 1 м/с до 5 м/с потужність ЛАД зростає на 20%, а ефективність зменшується на 27%).

Залежність раціональної потужності ЛД і економічного ефекту від коефіцієнту зціплення коліс електровозу з рейками приведена на рис. 3.2.5.

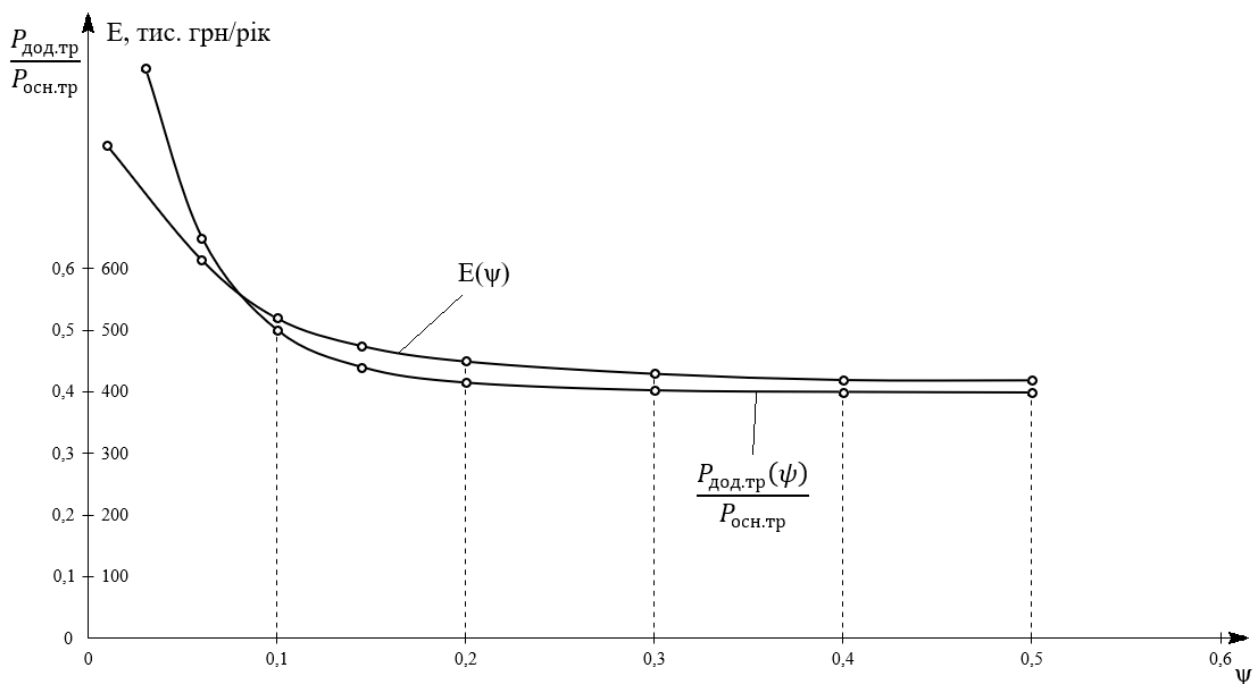


Рисунок 3.2.5. Залежність раціонального значення потужності додаткового приводу і ефективності його використання від коефіцієнту зчіплення коліс електровозу з рейками

З рис. 3.2.5 видно, що при коефіцієнті зчіплення більше за 0,2 його вплив на розглянуті характеристики незначний, проте при подальшому зниженні коефіцієнту зчіплення раціональна потужність ЛД і ефективність від його застосування різко підвищуються, і при коефіцієнті зчіплення 0,07 раціональна потужність ЛД і ефективність збільшуються більш ніж у 1,5 рази.

Залежність раціональної потужності ЛД і економічного ефекту від співвідношення вертикальної і горизонтальної складових сили тяги ЛД вказана на рис. 3.2.6.

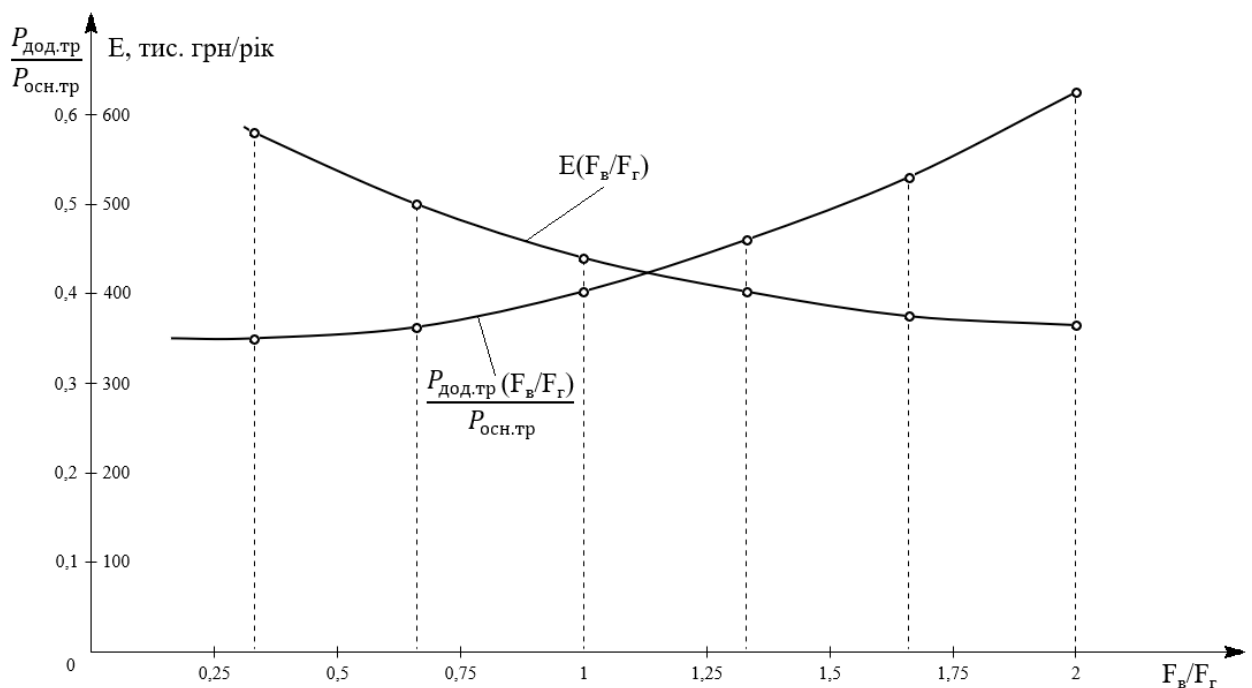


Рисунок 3.2.6. Залежність раціонального значення потужності додаткового приводу і ефективності його використання від відношення його вертикальної сили тяги до горизонтальної

З рис. 3.2.6 випливає, що зі збільшенням горизонтальної сили тяги ЛД раціональне значення його потужності і ефективності значно збільшуються, з чого слідує, що ефективність і раціональні параметри ЛД а значній мірі залежать від його конструкції, зокрема, від співвідношення вертикальної і горизонтальної складових сили тяги. При малій горизонтальній силі тяги (менше 30% від вертикальної) або її відсутності (наприклад, підмагнічування коліс електровозу) ефективність значно нижче, ніж при наявності як горизонтальної так і вертикальної сили тяги (на 35-65% у відповідності з результатами розрахунків). Вертикальна складова сили тяги також надає позитивний вплив, підвищуючи вагу потягу і, відповідно, зціпну масу. Ефект від використання ЛД з електропровідним вторинним матеріалом (мідь, алюміній) не значний через високу вартість вторинного елемента, особливо при великих довжинах відкатки, не дивлячись на їх кращі енергетичні і їх питомі тягові властивості (при вказаних вище умовах розрахунку економічна ефективність менше в 1,5-2 рази).

На рис. 3.2.7 приведена залежність струмів основного і додаткового приводів від співвідношення їх тривалої сили тяги.

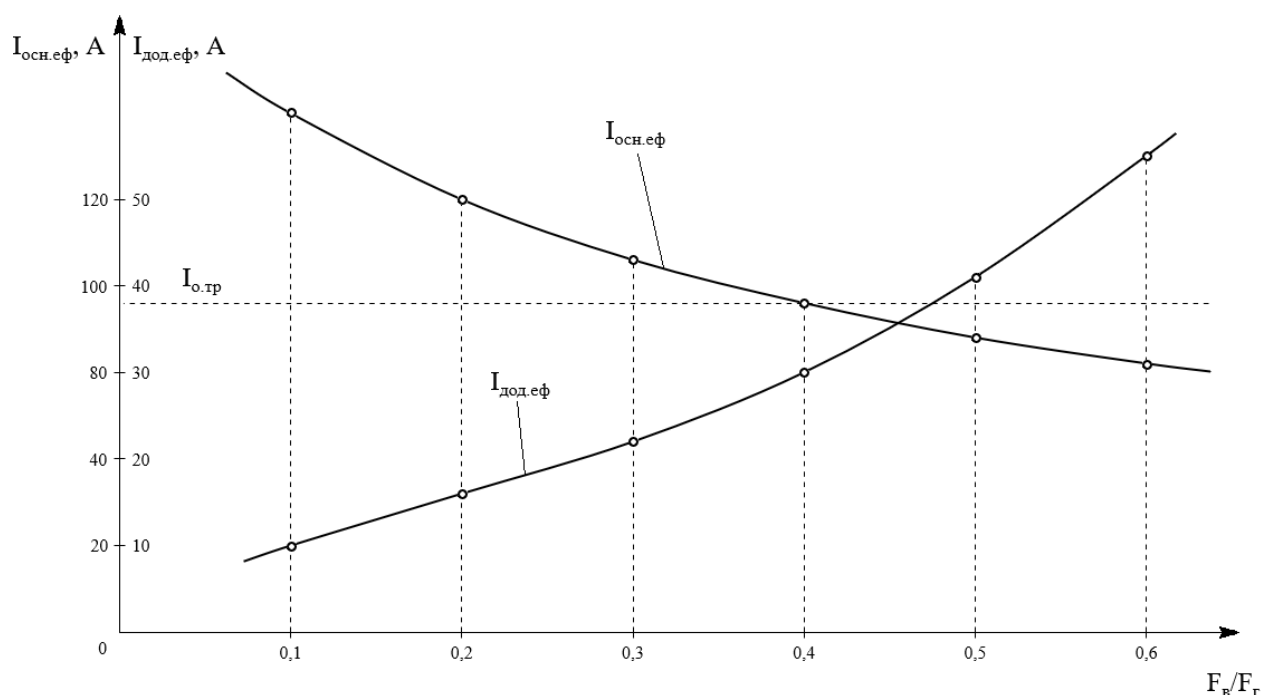


Рисунок 3.2.7. Залежність струмів основного і додаткового приводів від співвідношення їх тривалої сили тяги

Як видно з рис 3.2.7 існує співвідношення навантажень основного і додаткового приводів, при якому навантажувальний струм основного приводу рівний тривалому значенню. При цьому, з однієї сторони можливості основного приводу використовується повністю, а з іншої – тривала потужність ЛД найменша.

При імпульсному керуванні силою ЛД залежність струмів основного і додаткового приводів має вид, показаний на рис. 3.2.8. Як видно з рисунку, що приведений нижче, вид кривих аналогічний попередньому рисунку.

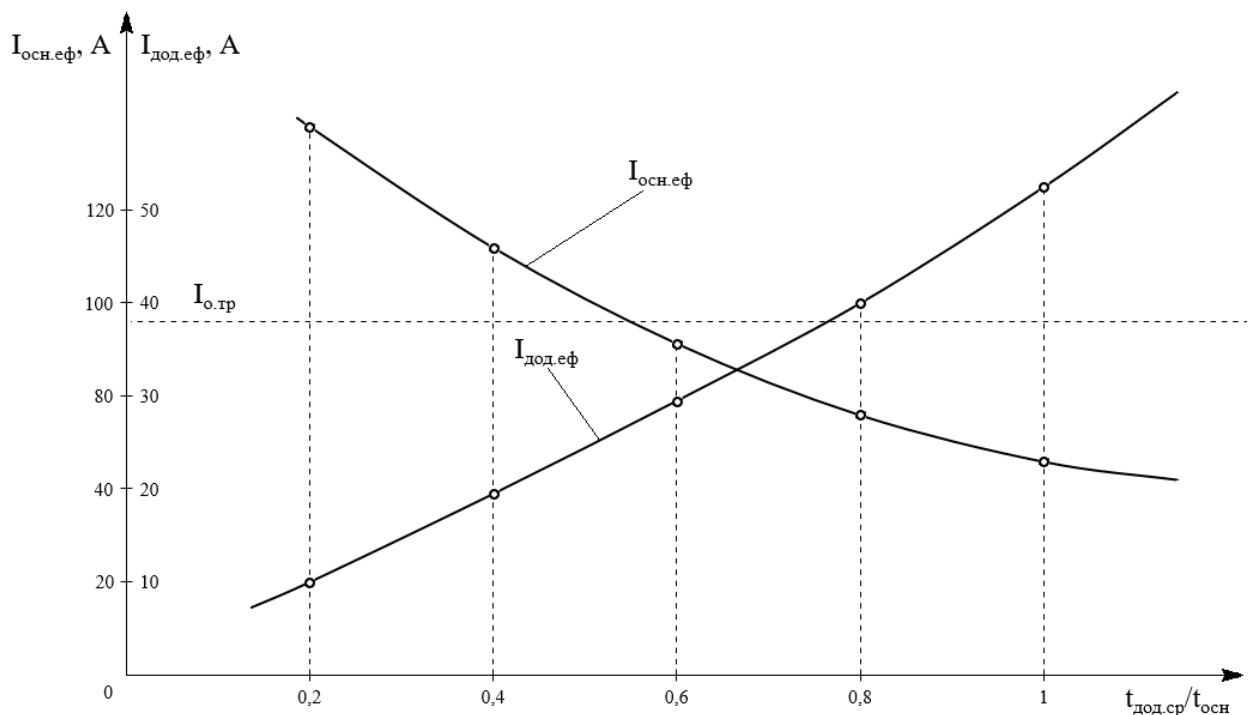


Рисунок 3.2.8. Залежність струмів основного і додаткового приводів від співвідношення їх тривалості включення ЛД до загального часу руху

3.3 Система керування додатковим електроприводом

Для забезпечення постійного тягового зусилля лінійного двигуна в широкому діапазоні швидкостей, необхідно забезпечити постійний потік в зазорі, що може бути забезпечений при використанні в якості перетворення автономного інвертора струму. Перетворювач повинен забезпечувати стійку роботу на низькосинусне навантаження, яким є асинхронний лінійний електродвигун, при малих синхронних швидкостях і, відповідно, частотах вихідного струму 1-3 Гц. З врахуванням вищесказаного, структурна схема додаткового приводу має вид, вказаний на рис. 3.3.1. Схема реалізує частотно-струмове керування приводом, режим джерела струму в інверторі реалізується за рахунок включення на його вхід релейних елементів охоплених зворотними зв'язками по струмах кожної з фаз. Інвертор реалізований на базі IGBT-транзисторів. В системі керування формується два контури регулювання, один з яких забезпечує стабілізацію потоку двигуна, другий – керує струмом і, відповідно, силою тяги ЛД.

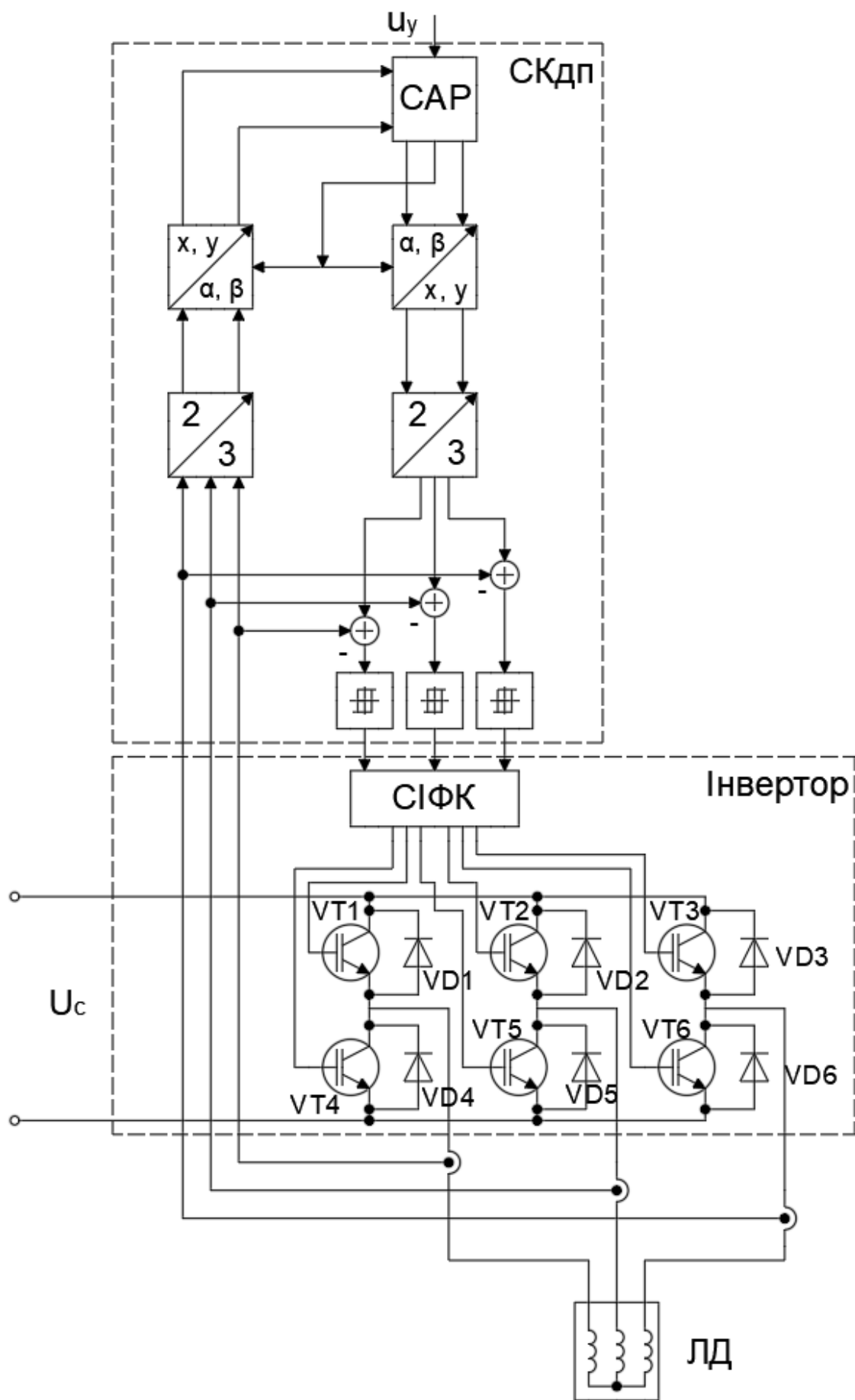


Рисунок 3.3.1. Система керування додатковим приводом

ВИСНОВОК

У даній роботі здійснено комплексне дослідження модернізації різноманітних електровозів, яке базується на інтеграції комбінованої системи тяги. Ця система поєднує класичний тяговий привід з лінійним асинхронним двигуном (ЛАД). Подібний підхід набуває особливої значущості в гірничодобувній галузі, для якої притаманні важкі умови експлуатації, включаючи значні ухили, підвищену вологість, зменшене зчеплення між рейками та колесами, а також регулярні випадки пробуксовування. Дослідження не просто підкреслює важливість комбінованих тягових систем, але й пропонує сувору теоретичну та модельну базу для їхнього практичного застосування.

У початкових частинах дослідження було розглянуто обмеження експлуатації класичних тягових систем. Ці традиційні системи повністю залежать від взаємодії колеса з рейкою, через що втрачають ефективність в умовах зменшеного зчеплення. Проковзування не тільки зменшує тягове зусилля, але й збільшує витрати на обслуговування через прискорений знос бандажів коліс та рейок, а також може спричинити аварійні зупинки внаслідок перегріву тягового двигуна. Гірничодобувна промисловість особливо страждає від таких недоліків, оскільки перепади ухилів часто перевищують можливості систем з колісним приводом. Отже, поліпшення тяги без кардинальної модернізації наявних електровозів стало ключовою інженерною задачею.

Для вирішення цієї задачі, в роботі розглядається використання лінійних асинхронних двигунів (ЛАД) як допоміжних тягових механізмів. Основна перевага ЛАД полягає в відсутності потреби в механічному контакті: тяга створюється за допомогою електромагнітної взаємодії між статором (закріпленим на транспортному засобі) та реактивною рейкою, розташованою вздовж колії. Це забезпечує ефективний рух навіть в умовах слабого зчеплення колеса з рейкою. ЛАД також менш чутливий до забруднень, вологи та якості поверхні рейки, що робить їх придатними для

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підземних транспортних мереж. Проте, лінійні асинхронні двигуни мають і недоліки, такі як знижена ефективність на низьких швидкостях, крайові ефекти, що виникають через їх відкритий магнітний ланцюг, та вищі витрати, зумовлені матеріалами, з яких виготовляється реактивний вторинний елемент. Таким чином, замість повної заміни основного приводу, ЛАД пропонується як адаптивна система підтримки, що активується за потреби. Вона приходить у дію тільки під час прискорення, перевантажень або на крутих підйомах, тобто у випадках, коли традиційний привід втрачає свою ефективність.

Другий розділ роботи присвячений схематичному проектуванню інтегрованої системи тяги. Він містить функціональну схему, що комбінує як головні, так і допоміжні приводи, які координуються центральним блоком керування, здатним миттєво реагувати на умови експлуатації. Також було створено математичні моделі ключових та додаткових приводів, що враховують різні динамічні стани, зокрема пружне та надлишкове прослизання. Ці моделі були застосовані для створення середовища моделювання в MATLAB, що дозволяє детально спостерігати перехідні процеси при запуску та зміні навантаження. Моделювання продемонструвало, що активація допоміжного ЛАД суттєво покращує час розгону та зменшує стрибки струму в головному приводі. Значна частина дослідження спрямована на визначення оптимальних параметрів ЛАД на основі енергоспоживання, вимог до тяги та економічної вигоди. Застосовуючи алгоритм покрокової оптимізації, у роботі оцінюються різні сценарії експлуатації різноманітних типів електровозів (К4 та К14) та конфігурацій вагонів (таких як ВГ-3 та ВГ-9). Отримані розрахунки підтверджують, що часткове використання ЛАД, а не постійне, забезпечує найвищу ефективність. Такий режим роботи також сприяє економії енергії, збільшенню терміну служби двигуна та зменшенню загального часу циклу транспортування за зміну.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практичні результати суттєві. По-перше, допоміжна система на основі ЛАД може підлягати модернізації для наявних електровозів, без значного перетворення їх основної конструкції. По-друге, вона відкриває можливість зменшення парку рухомого складу, бо один електровоз тепер здатний надійніше впоратись з більш важкими вантажами й крутішими ухилами. В підсумку, автоматизована система керування гарантує плавну інтеграцію обох приводів, виключаючи потребу в ручному втручанні оператора.

З наукової точки зору, робота робить внесок у розвиток теорії тяги в підземних транспортних системах шляхом інтегрування проектування електричних машин, теорії автоматичного керування та оптимізації системи. Запропоновані моделі та структура моделювання можуть виступити платформою для майбутніх досліджень або промислового впровадження.

На додаток до наведеної вище інформації, ця робота відкриває можливості для подальшого вивчення, наприклад проектування вдосконалених систем лінійного приводу з покращеною термодинамічною ефективністю та керуванням магнітним полем. Наступні дослідження також можуть передбачати апаратно-програмне тестування запропонованої системи, створення контролерів реального часу з використанням програмованих логічних контролерів (ПЛК) або вбудованих мікроконтролерів та інтеграцію з віддаленими діагностичними системами для проведення профілактичного обслуговування. Крім того, описаний підхід може бути адаптований для використання в інших обмежених середовищах, наприклад, у системах метрополітену або машинах для рятувальних операцій у тунелях, де надійність є ключовим фактором.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Скіданов В. М. Концепція гібридного тягового приводу для автономного технологічного електротранспорту / В. М. Скіданов, Т. О. Забава // Управління розвитком складних систем : зб. наук. праць / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури ; гол. ред. П. П. Лізунов – Київ : КНУБА, 2010. – № 2. – С. 70 - 75.
2. Дорошенко В. С. Системи керування електропривода рудникового електровоза АРП14 [Електронний ресурс] / В. С. Дорошенко, І. В. Обруч // Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених : зб. тез доп. 18-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 19-22 листопада 2024 р. / гол. Є. І. Сокол ; оргком.: Р. П. Мигущенко [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Електрон. текст. дані. – Харків : НТУ "ХПІ", 2024. – С. 312
3. Ляшенко М. Т. Розпізнавання надлишкового проковзування коліс та збільшення тягового зусилля рудникового електровоза [Електронний ресурс] / М. Т. Ляшенко // Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених : зб. тез доп. 17-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 28-30 листопада 2023 р. / гол. Є. І. Сокол ; оргком.: Р. П. Мигущенко [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Електрон. текст. дані. – Харків, 2023. – С. 230-231.
4. Кальмус, Д. О. і Сінчук, І. О. (2016) «Дослідження впливу коливань та короткочасних зникнень напруги живлення рудничного електровоза на роботу електричного приводу в режимі гальмування», Електроніка та Зв'язок, 21(5), с. 31–37.
5. Сінчук О. Н. та ін. «Комбінаторика перетворювачів напруги сучасних тягових електроприводів рудничних електровозів.» [Комбінаторика перетворювачів напруги сучасних тягових електроприводів шахтних електровозів.] Київ: ІЄДНАНУ, 2006, ISBN: 966-02-4067-8.
6. Коломойцев А.Д., Шорін В. Г., Голутвін В. А. Рудничний транспорт. Навчальний посібник - М., Недра, 1966. - 292 с.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Васильєв М. П., Алотін Л. М. Рудничний транспорт. Вид-во "Недра", 1964.
8. Системи керування рудничним електровозним транспортом П О.Н. Сінчук, Т.М. Берідзе, Е.С. Гузов та інш., М.: Недра, 1993.
9. Сьомочкін, А.Б., Федотов, В.О. і Кальмус, Д.О. 2018. Дослідження динаміки систем електроприводу для шахтних електровозів в умовах залізорудних підприємств. Мікросистеми, Електроніка та Акустика. 23, 3 (Чер 2018), 25–29.
10. Д. О. Кальмус, Ю. Б. Філіпп, і Т. М. Берідзе, «Особливості роботи електровозного транспорту в умовах залізорудних шахт», Мікросист., Електрон. та Акуст., т. 26, вип. 2, с. 237328–1 , Сер 2021.
11. Шокарев Д. А. Тяговий електропривод рудничного контактнo-акумуляторного електровоза/Д. А. Шокарев // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. тр. Темат. вип. : Проблеми автоматизованого електроприводу - Харків: НТУ "ХПІ". - 2013. - № 36 (1009). - С. 222-223.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.249с.2	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		