

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:

**Аналіз та оптимізація процесу розбудови алгоритмів керування системою
тягового електроприводу електровоза АМ8Д**

Виконав: студент групи ЕЕМ-23ск

Руслан НЕСТЕРЕНКО

Керівник випускної роботи _____ д.е.н., проф. Тетяна БЕРІДЗЕ

Нормо контролер _____ д.е.н., проф. Тетяна БЕРІДЗЕ

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

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

Кривий Ріг 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

НЕСТЕРЕНКО Руслан Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Аналіз та оптимізація процесу розбудови алгоритмів керування
системою тягового електроприводу електровоза АМ8Д

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є аналіз та оптимізація
процесу розбудови алгоритмів керування системою тягового
електроприводу електровоза АМ8Д
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Оцінка сучасного стану і перспектив розвитку рудникових електровозів на
підприємствах України; II. Визначення оптимальної структури тягового
електроприводу змінного струму для рудникових акумуляторних електровозів;
III. Розробка оптимальної структури системи «інвертор-асинхронний
двигун» для електровозу АМ8Д.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Схема системи керування електроприводом електровоза АМ8Д;
II. Стан ключів перетворювача; III. Алгоритми модуляції на двох рівнях
регулювання напруги двигунів; IV. Діаграми напруг отримані в пусковому
режимі; V. Перехідні процеси у системі електроприводу електровоза АМ8Д.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Тетяна БЕРІДЗЕ		
II	Тетяна БЕРІДЗЕ		
III	Тетяна БЕРІДЗЕ		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Сучасний стан електромеханічного обладнання рудникових електровозів	21.05.26
2	Оцінка технічного стану і перспектив розвитку рудникових електровозів	27.05.26
3	Структури тягового електроприводу електровозів постійного струму	31.05.26
4	Оптимальна структура тягового електроприводу змінного струму	07.06.26
5	Дослідження електромагнітних процесів	11.06.26
6	Порівняльний аналіз алгоритмів керування	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Руслан НЕСТЕРЕНКО
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Тетяна БЕРІДЗЕ
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Аналіз та оптимізація процесу розбудови алгоритмів керування системою тягового електроприводу електровоза АМ8Д»

49 с., 10 рис., 35 літературних джерел

Мета роботи: Підвищення енергоефективності, тягових властивостей та безпеки експлуатації підземного рейкового транспорту шляхом розробки, математичного моделювання та оптимізації мікропроцесорних алгоритмів керування системою тягового електроприводу акумуляторного електровоза АМ8Д, а також покращення тягово-зчіпних властивостей та подовження експлуатаційного ресурсу акумуляторних батарей шахтного рудникового електровоза АМ8Д шляхом розробки, системного аналізу та програмної оптимізації мікропроцесорних алгоритмів керування його тяговим електроприводом.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Здійснити ретроспективний аналіз штатних систем керування електровоза АМ8Д та обґрунтувати необхідність переходу до сучасних транзисторних (IGBT) перетворювачів із мікропроцесорним керуванням.

Проаналізувати тягові, гальмівні та перехідні режими роботи акумуляторного електровоза АМ8Д у специфічних умовах підземних гірничих виробок (змінний профіль колії, висока вологість, нестабільна маса поїзда).

Розробити математичну модель електромеханічної системи "акумуляторна батарея – перетворювач – тяговий двигун – колісна пара – рейка", яка враховує нелінійність характеристик зчеплення у специфічних умовах гірничих виробок (висока вологість, запиленість).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

Дослідити недоліки традиційних систем керування та обґрунтувати перехід до сучасних транзисторних або частотно-регульованих тягових електроприводів із мікропроцесорним керуванням.

Синтезувати та оптимізувати алгоритми широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для мінімізації комутаційних втрат та електромагнітних завад у тягових колах.

Розробити базову структуру алгоритмів прямого та векторного керування тяговим моментом, що враховує обмежену ємність автономного джерела живлення.

Розробити адаптивний протибоксувальний алгоритм на основі спостереження за швидкістю ковзання колісних пар для реалізації максимального тягового зусилля на межі зчеплення.

Оптимізувати програмні алгоритми захисту від боксування та юзу колісних пар на основі безперервного аналізу швидкостей осей та похідних тягового струму, мінімізуючи час реакції системи на втрату зчеплення.

Провести оцінку енергетичної ефективності запропонованих алгоритмів за критерієм збільшення часу автономної роботи електровоза на одному заряді тягової батареї.

Сформулювати та оптимізувати алгоритм рекуперативного гальмування для забезпечення максимального повернення кінетичної енергії поїзда назад в акумуляторну батарею на затяжних спусках.

АКУМУЛЯТОРНИЙ ЕЛЕКТРОВОЗ АМ8Д, ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД, АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ, МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, ЗЧЕПЛЕННЯ, КОВЗАННЯ, БОКСУВАННЯ, ПРОТИБОКСУВАЛЬНИЙ ЗАХИСТ, РЕКУПЕРАТИВНЕ ГАЛЬМУВАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	8
Розділ 1. Оцінка сучасного стану і перспектив розвитку рудникових електровозів на підприємствах України	15
1.1. Сучасний стан електромеханічного обладнання рудникових електровозів в Україні	15
1.2. Оцінка технічного стану і перспектив розвитку рудникових електровозів на підприємствах України	17
Розділ 2. Визначення оптимальної структури тягового електроприводу змінного струму для рудникових акумуляторних електровозів	19
2.1. Структури тягового електроприводу електровозів постійного струму	19
2.2. Оптимальна структура тягового електроприводу змінного струму для рудникових акумуляторних електровозів.....	21
Розділ 3. Розробка оптимальної структури системи «інвертор-асинхронний двигун» для електровозу АМ8Д	25
3.1. Дослідження електромагнітних процесів в системі «інвертор-асинхронний двигун» електровозу АМ8Д.....	25
3.2. Огляд, оцінка і порівняльний аналіз видів і типів алгоритмів керування системами тягового електроприводу	34
Висновки	39
Список використаних джерел	41
Додаток А.....	45
Додаток Б	46
Додаток В	47
Додаток Г	48

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Місце електровоза АМ8Д у гірничій логістиці

Акумуляторні електровози, серед яких однією з найпоширеніших та найвідоміших моделей є восьмитонний локомотив АМ8Д, відіграють ключову роль у транспортній системі вугільних та рудних шахт.

Вони є незамінними на дільницях, де за умовами газопилової небезпеки (вибухонебезпечне середовище) суворо заборонено використання контактної мережі, а також на вентиляційних та підготовчих горизонтах із складною розгалуженою структурою колій.

Від ефективності роботи цього виду транспорту залежить ритмічність подачі порожніх вагонеток до вибоїв та своєчасна видача гірничої маси до навколоствольного двору.

Основною проблемою акумуляторної тяги є жорстке обмеження запасу енергії на борту локомотива.

Час безперервної роботи електровоза визначається ємністю його тягової батареї.

Якщо енергія витрачається неефективно, виникає потреба у частій заміні акумуляторних ящиків на зарядних станціях, що призводить до значних технологічних простоїв, збільшує потребу у великому парку резервних батарей та роздуває експлуатаційні витрати підприємства.

Криза традиційних систем та перехід до мікропроцесорного керування

Класичне виконання електровоза АМ8Д передбачало використання контакторно-резисторної системи керування двигунами постійного струму.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ця система відрізнялася вкрай низькою енергоефективністю, оскільки під час пуску поїзда та регулювання швидкості значна частина дорогоцінної енергії акумулятора просто розсіювалася у вигляді тепла на пускових резисторах.

Крім того, ступінчасте перемикання контакторів викликало сильні ривки в упряжних приладах вагонеток та сприяло зриву коліс у боксування на вологих або забруднених шахтних рейках.

Сучасна модернізація передбачає впровадження імпульсних напівпровідникових систем керування (на базі IGBT-транзисторів) або повний перехід на асинхронний тяговий привід із частотним регулюванням.

Однак апаратна заміна силової частини вирішує лише половину проблеми. Головний інтелектуальний тягар лягає на мікропроцесорний контролер, який повинен керувати силовими ключами.

Саме якість, швидкість та адекватність закладених у нього алгоритмів визначають реальну поведінку локомотива на колії.

Специфіка та необхідність оптимізації алгоритмів

Розбудова алгоритмів керування для шахтного електровоза є нетривіальним інженерним завданням.

Процес вимагає глибокої оптимізації через низку суперечливих факторів:

- Алгоритми плавного пуску та обмеження динамічних зусиль. Алгоритміка контролера повинна формувати такий градієнт наростання тягового моменту, який забезпечить впевнене зрушення важкого поїзда, але не допустить розриву зчіпок та надмірного кидка струму, здатного пошкодити акумуляторну батарею.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Адаптивні алгоритми протибоксувального захисту. В умовах шахти рейки часто покриті вологим вугільним або породним шламом, що критично знижує коефіцієнт зчеплення. Програмний алгоритм має миттєво розпізнавати початкову фазу зриву колеса у боксування (за прискоренням осі та зміною навантаження) і превентивно знижувати тяговий момент на конкретному двигуні, відновлюючи зчеплення без повної зупинки поїзда.

- Алгоритми рекуперації. Оптимізація програмного забезпечення гальмівних режимів дозволяє перевести тягові двигуни в режим генераторів під час гальмування або руху на спуск. Алгоритм має забезпечити плавне регулювання гальмівного зусилля оператором, одночасно контролюючи рівень напруги, що повертається у батарею, аби уникнути її перезаряду чи закипання електроліту.

Наукова та практична цінність

Дослідження та оптимізація процесу розбудови цих алгоритмів дозволяє звести до мінімуму обчислювальне навантаження на бортовий мікроконтролер, підвищивши надійність системи реального часу.

Практичне впровадження оптимізованих алгоритмів на електровозах серії АМ8Д гарантує зростання загального коефіцієнта корисної дії тягової системи.

Це прямо конвертується у збільшення пробігу локомотива на одному заряді батареї (в середньому на чверть порівняно з неоптимізованими імпульсними системами), зниження зносу бандажів колісних пар та підвищення загальної безпеки ведення поїзда в складних гірничо-геологічних умовах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Специфіка експлуатації електровоза АМ8Д

Акумуляторний рудниковий електровоз АМ8Д (зчіпна маса **8 тонн**) є одним із найпоширеніших видів підземного локомотивного транспорту на вугільних і рудних шахтах.

Головною його перевагою є повна автономність та високий рівень вибухобезпеки, що дозволяє працювати у виробках, небезпечних за газом (метаном) та пилом.

Джерелом живлення електровоза є тягова акумуляторна батарея, запас енергії якої є суворо обмеженим і визначає тривалість безперервної роботи локомотива протягом робочої зміни.

Історично електровози серії АМ8Д оснащувалися тяговими двигунами постійного струму з реостатно-контакторною (РКСУ) або тиристорно-імпульсною (ТІСУ) системами керування.

Ці системи характеризуються значними втратами енергії (до **15-20%** ємності батареї розсіюється у вигляді тепла на пускових реостатах), низькою плавністю ходу та високою схильністю до боксування колісних пар при рушанні з місця.

Сучасна модернізація передбачає перехід на транзисторні (IGBT) ШІМ-перетворювачі або частотно-регульований асинхронний привід.

Однак, заміна апаратної частини не дає максимального ефекту без розбудови глибоко оптимізованих алгоритмів керування.

Математичне підґрунтя оптимізації алгоритмів

Головним викликом при створенні алгоритмів керування для рудникового електровоза є забезпечення максимального тягового зусилля в умовах нестабільного коефіцієнта зчеплення.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

В умовах шахти рейки часто покриті водяною плівкою, вугільним або породним шламом, що знижує значення до критичних **0.08–0.12**.

Оптимальний алгоритм керування повинен підтримувати роботу тягового приводу у зоні мікроковзання.

Сила тяги реалізується за умови різниці між коловою швидкістю колеса та лінійною швидкістю локомотива.

Алгоритм мікропроцесорного керування (наприклад, на базі ПІД-регулятора або алгоритмів нечіткої логіки) повинен безперервно обчислювати електромагнітний момент за рівнянням руху.

Якщо алгоритм фіксує різке зростання похідної без відповідного збільшення лінійної швидкості, система повинна миттєво зменшити шпаруватість ШІМ-сигналу, знижуючи напругу на двигуні для припинення макробоксування і повернення робочої точки на оптимум кривої зчеплення.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Напрямки оптимізації та практичне значення

Завдання алгоритму	Традиційний підхід	Оптимізований алгоритм
Регулювання струму	Ступінчасте (перемикання контакторів).	Безперервне, плавне регулювання з використанням адаптивної частоти ШІМ.
Протибоксувальний захист	Реле максимального струму, втручання машиніста (скидання позиції контролера).	Автоматичне виявлення ковзання за швидкістю ротора, мікросекундна корекція крутного моменту.
Гальмування	Механічне (колодкове) та реостатне. Енергія втрачається.	Рекуперативне гальмування практично до повної зупинки з поверненням заряду в акумуляторну батарею.

Практичне значення розбудови та оптимізації алгоритмів керування для електровоза АМ8Д полягає у кардинальному підвищенні його експлуатаційних характеристик без зміни базової механічної конструкції.

За рахунок ліквідації втрат на пускових опорах та впровадження рекуперації досягається економія до **30%** енергії батареї, що дозволяє електровозу гарантовано відпрацювати повну зміну.

Крім того, автоматизація контролю зчеплення значно знижує знос бандажів колісних пар і рейок, а також полегшує умови праці машиніста в складних умовах підземних виробок.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Розділ 1. Оцінка сучасного стану і перспектив розвитку рудникових електровозів на підприємствах України

1.1. Сучасний стан електромеханічного обладнання рудникових електровозів в Україні

Сучасний стан електромеханічного обладнання рудникових електровозів в Україні є предметом ретельного аналізу та оцінки.

Збереження й вдосконалення цього обладнання відіграє ключову роль у забезпеченні безперебійної та безпечної експлуатації шахт.

Одним із головних аспектів оцінки є технічний стан електродвигунів.

Велика частина електродвигунів потребує ремонту або заміни через зношення деталей та механічну «втому» матеріалів.

Крім того, електромагнітні гальма, контактори та інші складові системи електровозів також потребують уваги.

Системи гальмування та сигналізації формують комплекс пристроїв, які безпосередньо відносяться до безпеки робітників і обладнання, і потребують постійного моніторингу стану і ступеню справності згідно з встановленими нормами.

Комплекс подібних дій є обов'язковим, так як прямо впливає на виникнення ризиків для здоров'я і життя обслуговуючого персоналу електровозів та інших робітників шахт і рудників.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1	Лім.	Лист	Листів
Розробив	Нестеренко РВ						15	4
Перевірив	Берідзе Т.М.							
Реценз.						КНУ ЕЕМ-23ск		
Н. Контр.	Берідзе Т.М.							
Затвердив	Пересунько І.І.							

Капітальні вкладення, необхідні для забезпечення відповідного ряду дій з перевірки, обслуговування, ремонту і заміни даного типу обладнання електровозів, складають значну частку від загальних витрат на утримання парку локомотивного транспорту.

Зменшення цих витрат при збереженні поточного рівня забезпечення безпеки експлуатації рудникових електровозів та його зростанні є одним з пріоритетних напрямків роботи з підвищення якості і ефективності роботи шахт і рудників України.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Оцінка технічного стану і перспектив розвитку рудникових електровозів на підприємствах України

Окрім технічного стану електровозів та безпеки їхньої експлуатації, ефективність роботи електровозів також залежить від їх енергоефективності.

У зв'язку з підвищенням вартості енергії, зусилля інженерів і науковців спрямовуються на оптимізацію споживання електроенергії і загального підвищення ККД всіх систем електровозів і супутнього обладнання.

Перехід до більш енергоємних та екологічно чистих джерел енергії, таких як використання відновлюваних джерел енергії або впровадження технологій з ефективним використанням енергії і перебудова наявних систем електропостачання шахт і рудників може допомогти у вирішенні цієї проблеми.

Подальший розвиток та впровадження сучасних енергоефективних технологій, таких як регенеративне гальмування та системи збереження енергії, можуть значно знизити споживання електроенергії та вплив на довкілля.

Збільшення глибин горизонтів видобутку також потребує уваги і аналізу у контексті розгляду процесу транспортування руди електровозами.

За очевидних причин, у процесі діяльності шахт і рудників при збільшенні глибин видобутку корисних копалин пропорційно зростає навантаження на систему транспортування руди.

Відповідно збільшуються матеріальні затрати на обслуговування локомотивного транспорту, логістику, електроенергію, що в свою чергу прямо відображається на кінцевій вартості продукції.

За 20 років кількість шахт в Україні, середня глибина яких перевищує 1000 м зросла з 20% до 40%.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того варто враховувати тенденцію до збільшення відстаней транспортування видобутої руди від забоїв до стволів шахт.

Вже зараз більшість шахт і рудників досягли значень цього показника в 10 км і більше, з подальшими перспективами до зростання.

Крім суто технічних і технологічних аспектів функціонування електровозів в структурі гірничо-рудних підприємств, важливо враховувати й інноваційні тенденції у сфері рудничного господарства, які можуть вплинути на ефективність роботи як окремого обладнання та і рудникових електровозів загалом.

Наприклад, впровадження системи "інтернету речей" (IoT) може допомогти в моніторингу технічного стану обладнання в реальному часі, що сприятиме своєчасному виявленню потенційних проблем.

Підвищення ефективності та надійності рудникових електровозів також може бути досягнуте через впровадження системи моніторингу та діагностики з використанням сучасних технологій штучного інтелекту (ШІ).

Аналіз даних, отриманих з сенсорів та систем моніторингу, може допомогти передбачити виникнення аварійних ситуацій та запобігти їх появі шляхом проведення передчасного технічного обслуговування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Розділ 2. Визначення оптимальної структури тягового електроприводу змінного струму для рудникових акумуляторних електровозів

2.1. Структури тягового електроприводу електровозів постійного струму

Структури тягового електроприводу електровозів постійного струму різноманітні.

Завдяки зусиллям і досягненням вітчизняних інженерів, на заміну звичайним резисторно-контактним схемам були представлені сучасні безрезисторні.

Також були представлені імпульсні перетворювачі з тиристорами та силовими транзисторами у своїй структурі.

Перші зразки таких перетворювачів від ЗАТ «Амплітуда» вже були встановлені і випробувані на акумуляторних електровозах вугільних шахт, проте не отримали поширення і достатньої уваги.

Основною причиною є висока вартість даних систем з ІІ для використання в рудникових і шахтних електровозах.

Попри тенденцію до зменшення цін на комплектуючі до даних систем, фахівцями було визначено неперспективним даний напрямок модернізації наявних електровозів.

Натомість пріоритет було надано відмові від двигунів постійного струму і розробці імпульсних систем керування саме для приводів змінного струму.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив	Нестеренко РВ				Розділ 2	Літ.	Лист	Листів
Перевірів	Берідзе Т.М.						19	6
Реценз.								
Н. Контр.	Берідзе Т.М.							
Затвердив	Пересунько І.І.					КНУ ЕЕМ-23ск		

Причинами відмови від використання двигунів постійного струму послідовного збудження є їхня загальна ненадійність та відносно низький коефіцієнт корисної дії.

Окрім цього, уся структура електроприводу, до складу якої входять двигуни постійного струму, має низькі енергетичні показники зумовлені використанням в них застарілих і неефективних засобів керування (напр, реостатів) і контролю.

Додаткові складнощі при експлуатації двигунів даного типу виникають при русі на так званій ділянці малих навантажень механічної характеристики, що потенційно небезпечне неконтрольованим прискоренням електровозу, а також при переході електровозу в гальмівний режим.

В умовах сучасного виробництва високі матеріальні витрати на ремонт і обслуговування приводів з двигунами постійного струму послідовного збудження електровозів є недопустимими і стають причиною фінансових втрат, а відповідно і зниження ефективності роботи шахти чи рудника, що проявляється у зниженні якості і кількості продукції, а також погіршенню умов роботи і забезпечення робітників.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Оптимальна структура тягового електроприводу змінного струму для рудникових акумуляторних електровозів

Як було згадано раніше, попри задовільну роботу і ефективність використання електроприводів постійного струму в структурах ТЕП акумуляторних електровозів, досить гостро стоїть питання їхньої глибокої модернізації, повної або часткової заміни на аналогічні за потужністю типи змінного струму.

Це пояснюється зростаючим попитом на такі системи, їхніми кращими механічними і енергетичними, а також масо-габаритними показниками.

Процес вибору і аналізу існуючих структур тягового електроприводу змінного струму, які можуть бути використані в акумуляторних електровозах складний і вимагає урахування багатьох факторів і параметрів робочого середовища, режимів роботи і особливостей механізму електровозів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Рис. 2.1. Схема живлення тягового електродвигуна та іншого електрообладнання електровоза АМ8Д

Як видно з рисунку трифазна мостова схема має класичний вигляд і складається з шести силових транзисторів VD1-VD6 шунтованих діодами D1-D6 з метою захисту від пробією високою напругою і напругою зворотної полярності.

Наведена схема може бути спрощена з урахуванням особливостей об'єкта дослідження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Живлення тягового електродвигуна та іншого електрообладнання електровоза АМ8Д відбувається від блоку акумуляторних батарей з номінальним значенням напруги – 115В.

Подвійне перетворення електричної енергії джерела живлення не потребується, відповідно схема може набувати наступного вигляду:

Рис. 2.2. Схема живлення тягового електродвигуна та іншого електрообладнання електровоза АМ8Д від блоку акумуляторних батарей з номінальним значенням напруги – 115В

Отримана на рис. 2.2 схема являє собою класичне зображення трифазного автономного інвертора з живленням від акумуляторних батарей.

Подібна структура в останній час набула неабиякого поширення у зв'язку з популяризацією і стрімким розвитком електротранспорту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Сучасні системи тягового електроприводу, наприклад, електромобілів і вантажівок побудовані за схемою «акумуляторна батарея – автономний інвертор напруги – двигун», включають в себе набір засобів захисту і керування напругою/обертами електродвигуна.

Керування двигуном здійснюється, переважно за допомогою техніки широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) зі зворотнім зв'язком по датчикам аналізу стану параметрів двигуна.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 3. Розробка оптимальної структури системи «інвертор-асинхронний двигун» для електровозу АМ8Д

3.1. Дослідження електромагнітних процесів в системі «інвертор-асинхронний двигун» електровозу АМ8Д

Подальший розгляд і розрахунок параметрів системи керування і вибір основного алгоритму керування електроприводом електровоза в повній мірі залежить від розуміння протікання електромагнітних процесів у визначеній системі АІН-ТАД.

Першочергово обирається найоптимальніша методика для аналізу.

Згідно загальноприйнятим положенням базовим методом дослідження електромагнітних процесів, що протікають в системі АІН-ТАД є метод кусочно-лінійної апроксимації.

Опишемо цей метод детальніше.

Згідно методики об'єкт дослідження – двигун, може бути представлений у вигляді активно-індуктивного навантаження і описаний рядом функцій, які в свою чергу можуть бути вирішені за допомогою звичайних лінійних диференціальних рівнянь або перетворення Лапласа.

Дані функції є результатом вирішення системи рівнянь, яка описує роботу системи АІН-ТАД на різних послідовних інтервалах часу з прирівнюванням кінцевого значення поточного інтервалу з початковим значенням наступного.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 3				Лім.	Лист	Листів
Розробив		Нестеренко РВ									
Перевірів		Берідзе Т.М.								24	14
Реценз.									КНУ ЕЕМ-23ск		
Н. Контр.		Берідзе Т.М.									
Затвердив		Пересунько І.І.									

Кожен визначений інтервал співпадає с фізичним переключенням (зміною стану) вентиля автономного інвертора напруги.

Детальний опис і дослідження роботи системи за цим методом потребують достатньо великих затрат часу та обчислювальних потужностей, тому для складного опису динаміки роботи системи приводу з автономним інвертором напруги і асинхронним двигуном цей метод не підходить.

Для отримання точних результатів аналізу роботи системи АІН-ТАД у динаміці використовують метод, що полягає у складанні системи рівнянь Максвелла з подальшим перетворенням Парка.

Таким чином відбувається заміщення трифазної схеми досліджуваної електричної машини на двофазну в системі координат d-q.

Отриману в результаті перетворень еквівалентну систему рівнянь вирішують у відповідних програмних пакетах, таких як Ansys Maxwell або Matlab.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

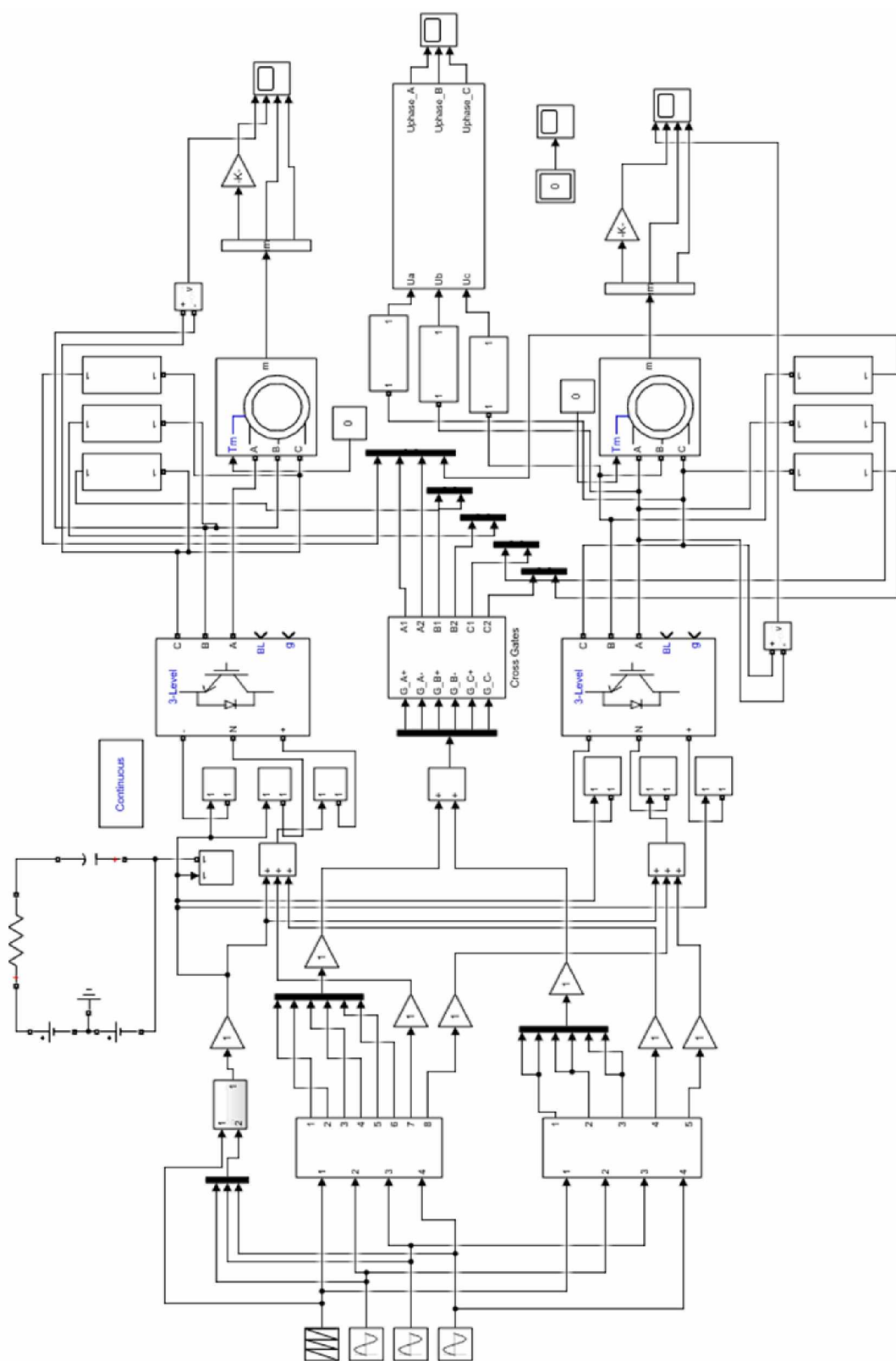


Рис. 3.1. Схема системи керування електроприводом електровоза АМ8Д

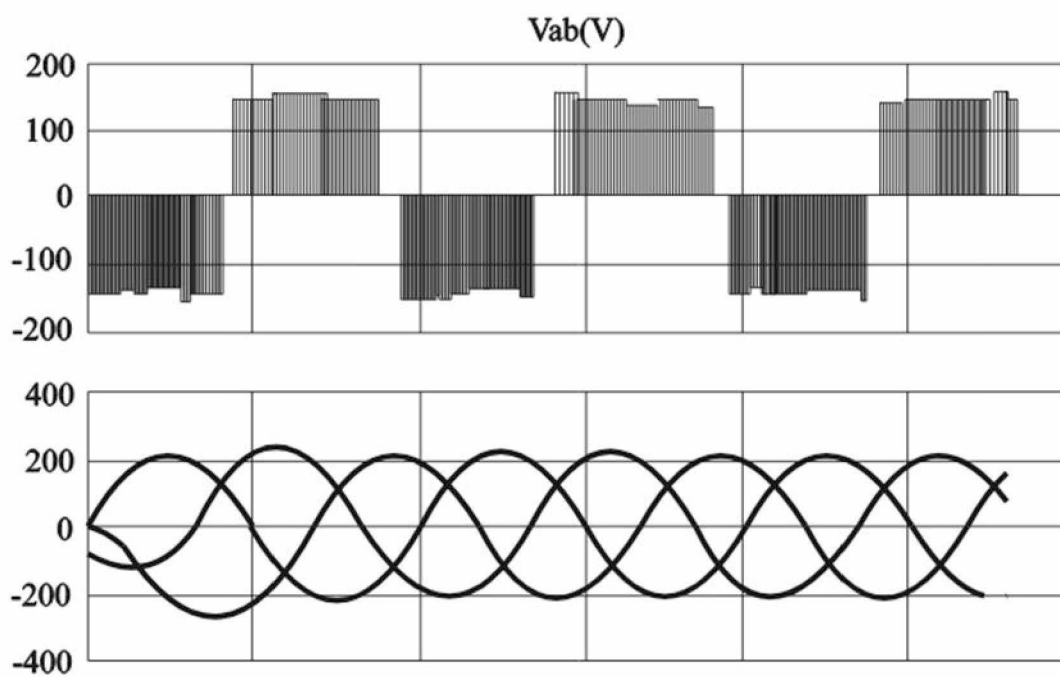


Рис. 3.2. Перехідні процеси у системі електроприводу електровоза АМ8Д

Рис. 3.3. Перехідні процеси у системі електроприводу електровоза
АМ8Д

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 3.4. Перехідні процеси у системі електроприводу електровоза
АМ8Д

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 3.5. Перехідні процеси у системі електроприводу електровоза
АМ8Д

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 3.6. Перехідні процеси у системі електроприводу електровоза АМ8Д

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 3.7. Перехідні процеси у системі електроприводу електровоза АМ8Д

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Огляд, оцінка і порівняльний аналіз видів і типів алгоритмів керування системами тягового електроприводу

Система тягового електроприводу містить два тягових асинхронних двигуна електровоза, на кожний з них працює окремий блок АІН.

Керування швидкістю двигунів відбувається шляхом подачі керуючих імпульсів на транзистори VT і тиристори VS, вмикаючи і вимикаючи їх, таким чином реалізуючи заданий алгоритм модуляції сигналу на виході інвертора.

Робота схеми може бути умовно поділена на 3 рівні – пусковий режим, розгін, робота у номінальному (тривалому режимі).

Розглянемо кожний з них окремо.

Ефективна робота інвертора і системи керування загалом потребує складання таблиці стану ключів перетворювача.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наприклад відповідна таблиця стану ключів АІН для забезпечення пуску електровоза наступна:

Табл. 3.1. Стан ключів перетворювача

Позначення стану перетворювача	Увімкнені діоди, тиристори, транзистори					
V0	VSU	VSU	VSU			
V1	V.PU1	VSU	VSU	V.MU2		
V2	V.PU1	V.PV1	VSU	V.MU2	V.MV2	
V3	VSU	V.PV1	V.PW1		V.MV2	
V4	VSU	V.PV1	V.PW1		V.MV2	V.MW2
V5	VSU	VSU	V.PW1			V.MW2
V6	V.PU1	VSU	V.PW1	V.MU2		V.MW2
W0	V.PU1	V.PV1	V.PW1	V.MU2	V.MV2	V.MW2
W1	V.PU1	V.MV1	V.MW1	V.MU2	V.PV2	V.PW2
W2	V.PU1	V.PV1	V.MW1	V.MU2	V.PV2	V.PW2
W3	V.MU1	V.PV1	V.MW1	V.PU2	V.MV2	V.PW2
W4	V.MU1	V.PV1	V.PW1	V.PU2	V.MV2	V.MW2
W5	V.MU1	V.MV1	V.PW1	V.PU2	V.MV2	V.MW2
W6	V.PU1	V.MV1	V.PW1	V.MU2	V.PV2	V.MW2

Реалізація пускового режиму починається з установки ключів у наведені у табл. 3.1 стани.

Таким чином два асинхронні двигуни М1 та М2 з'єднуються послідовно, схема працює згідно алгоритмів модуляції.

Відомості про задані алгоритми модуляції наведені в табл. 3.2.

На рис. 3.8 зображені отримані в пусковому режимі діаграми напруг.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

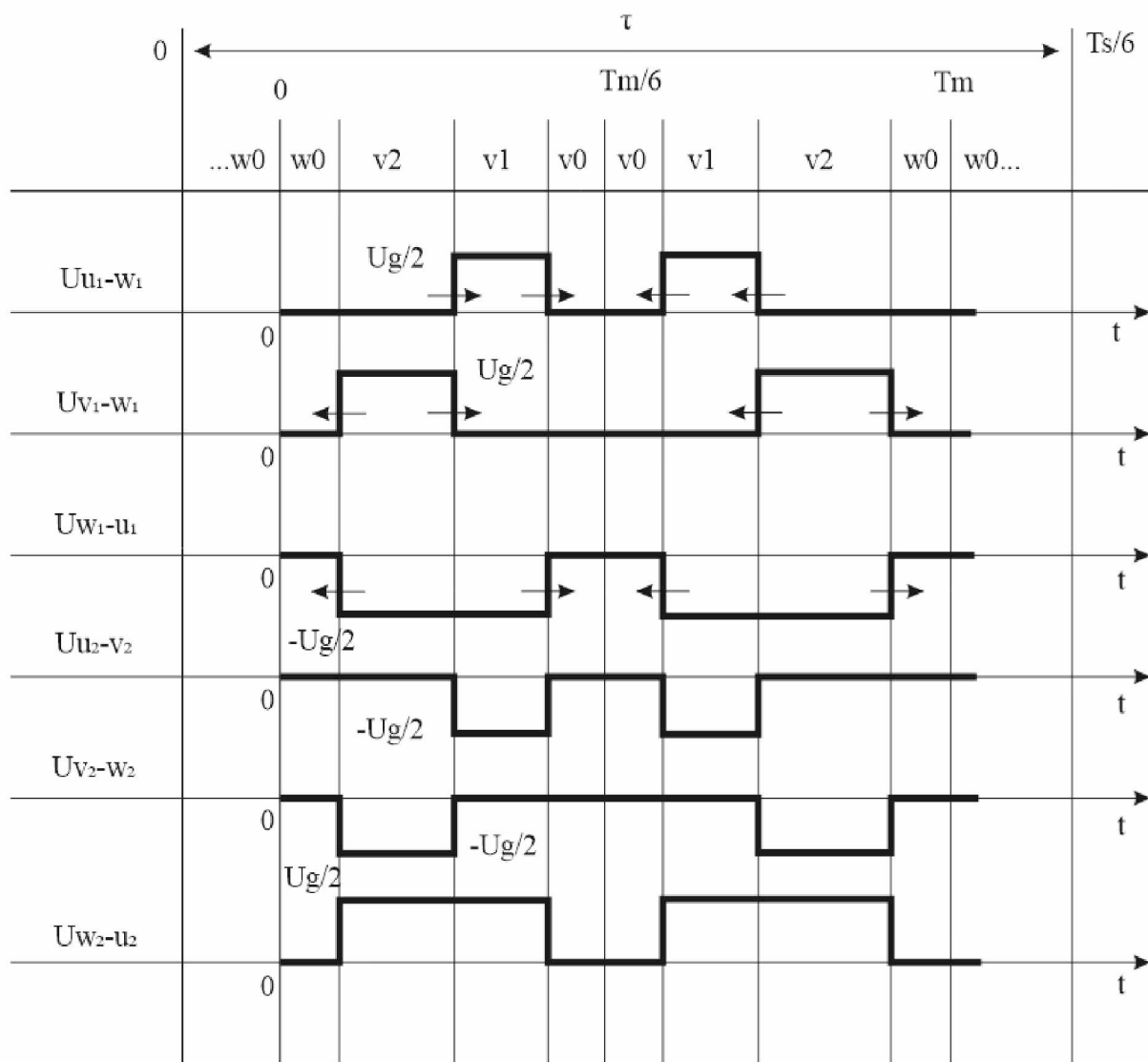


Рис. 3.8. Діаграми напруг отримані в пусковому режимі

де T_s – період першої гармоніки напруги $U_{вих}$ АІН

T_m – період модуляції за який відбувається переключення стану інверторів U_1 та U_2 згідно заданого алгоритму

$t_1-t_6 = T_s/6$ – інтервали перемикування фаз

На наведеній схемі для покращення сприйняття діаграми розглядаються лише на одному інтервалі t_1 за один період T_m .

Табл. 3.2. Алгоритми модуляції на двох рівнях регулювання напруги двигунів

Позначення інтервалів перемикання фаз АД			τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6
Межі інтервалів			$0 \dots \frac{T_s}{6}$	$\frac{T_s}{6} \dots \frac{T_s}{3}$	$\frac{T_s}{3} \dots \frac{T_s}{2}$	$\frac{T_s}{2} \dots \frac{2T_s}{3}$	$\frac{2T_s}{3} \dots \frac{5T_s}{6}$	$\frac{5T_s}{6} \dots T_s$
Алгоритми модуляції	1 рівень	$\left[0 \dots \frac{T_m}{2}\right]$	w0- v2- v1-v0	w0-v2- v3-v0	w0- v4-v3- v0	w0-v4- v5-v0	w 0-v6-v5- v0	w 0-v6- v1-v0
		$\left[\frac{T_m}{2} \dots T_m\right]$	v0- v2- v3-w0	v0-v3- v2-w0	v0-v3- v4-w0	v0-v5- v4-w0	v 0-v5-v6- w0	v 0-v1- v6-w0
	2 рівень	$\left[0 \dots \frac{T_m}{2}\right]$	v2- w2- v2-w2	v3-w3- v3-w3	v4- w4- v4-w4	v5-w5- v5-w5	v 6-w6-v5- w6	v 1-w1- v1-w1
		$\left[\frac{T_m}{2} \dots T_m\right]$	w2- v2- w2-v2	w3-v3- w3-v3	w4- v4- w4-v4	w5-v5- w5-v5	w 6-v6-w6- v6	w 1-v1- w1-v1

Висновки

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

Здійснити ретроспективний аналіз штатних систем керування електровоза АМ8Д та обґрунтувати необхідність переходу до сучасних транзисторних (IGBT) перетворювачів із мікропроцесорним керуванням.

Проаналізувати тягові, гальмівні та перехідні режими роботи акумуляторного електровоза АМ8Д у специфічних умовах підземних гірничих виробок (змінний профіль колії, висока вологість, нестабільна маса поїзда).

Розробити математичну модель електромеханічної системи "акумуляторна батарея – перетворювач – тяговий двигун – колісна пара – рейка", яка враховує нелінійність характеристик зчеплення у специфічних умовах гірничих виробок (висока вологість, запиленість).

Дослідити недоліки традиційних систем керування та обґрунтувати перехід до сучасних транзисторних або частотно-регульованих тягових електроприводів із мікропроцесорним керуванням.

Синтезувати та оптимізувати алгоритми широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для мінімізації комутаційних втрат та електромагнітних завад у тягових колах.

Розробити базову структуру алгоритмів прямого та векторного керування тяговим моментом, що враховує обмежену ємність автономного джерела живлення.

Розробити адаптивний протибоксувальний алгоритм на основі спостереження за швидкістю ковзання колісних пар для реалізації максимального тягового зусилля на межі зчеплення.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Оптимізувати програмні алгоритми захисту від боксування та юзу колісних пар на основі безперервного аналізу швидкостей осей та похідних тягового струму, мінімізуючи час реакції системи на втрату зчеплення.

Провести оцінку енергетичної ефективності запропонованих алгоритмів за критерієм збільшення часу автономної роботи електровоза на одному заряді тягової батареї.

Сформулювати та оптимізувати алгоритм рекуперативного гальмування для забезпечення максимального повернення кінетичної енергії поїзда назад в акумуляторну батарею на затяжних спусках.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Pivnyak, G., Volkov, A., & Shirin, L. (2014). Transport in the Mining Industry: Modern Challenges and Innovations. CRC Press.
2. Синчук, О. М., & Афанасьев, В. В. (2013). Системы тягового электропривода рудниковых электровозов. Кривий Ріг: КНУ.
3. Steimel, A. (2008). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag.
4. Bose, B. K. (2006). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Academic Press.
5. Leonhard, W. (2001). Control of Electrical Drives (3rd ed.). Springer.
6. Halvorsen, R. (2012). Battery powered underground mining vehicles: A review of the technology. Mining Technology, 121(3), 136-141.
7. Trzynadlowski, A. M. (2001). Control of Induction Motors. Academic Press.
8. Kadowaki, S., Ohishi, K., & Yasukawa, S. (2004). Anti-slip readhesion control of electric commuter train based on disturbance observer. Proceedings of the IECON, 2, 1145-1150.
9. Park, Y., Kim, H., & Kim, J. (2001). Adhesion control of electric motor coaches based on force control. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 48(4), 820-825.
10. Zinoviev, G. S. (2010). Fundamentals of Power Electronics. NSTU.
11. Spiriyagin, M., Cole, C., Sun, Y. Q., McClanachan, M., Spiriyagin, V., & McSweeney, T. (2014). Design and Simulation of Rail Vehicles. CRC Press.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

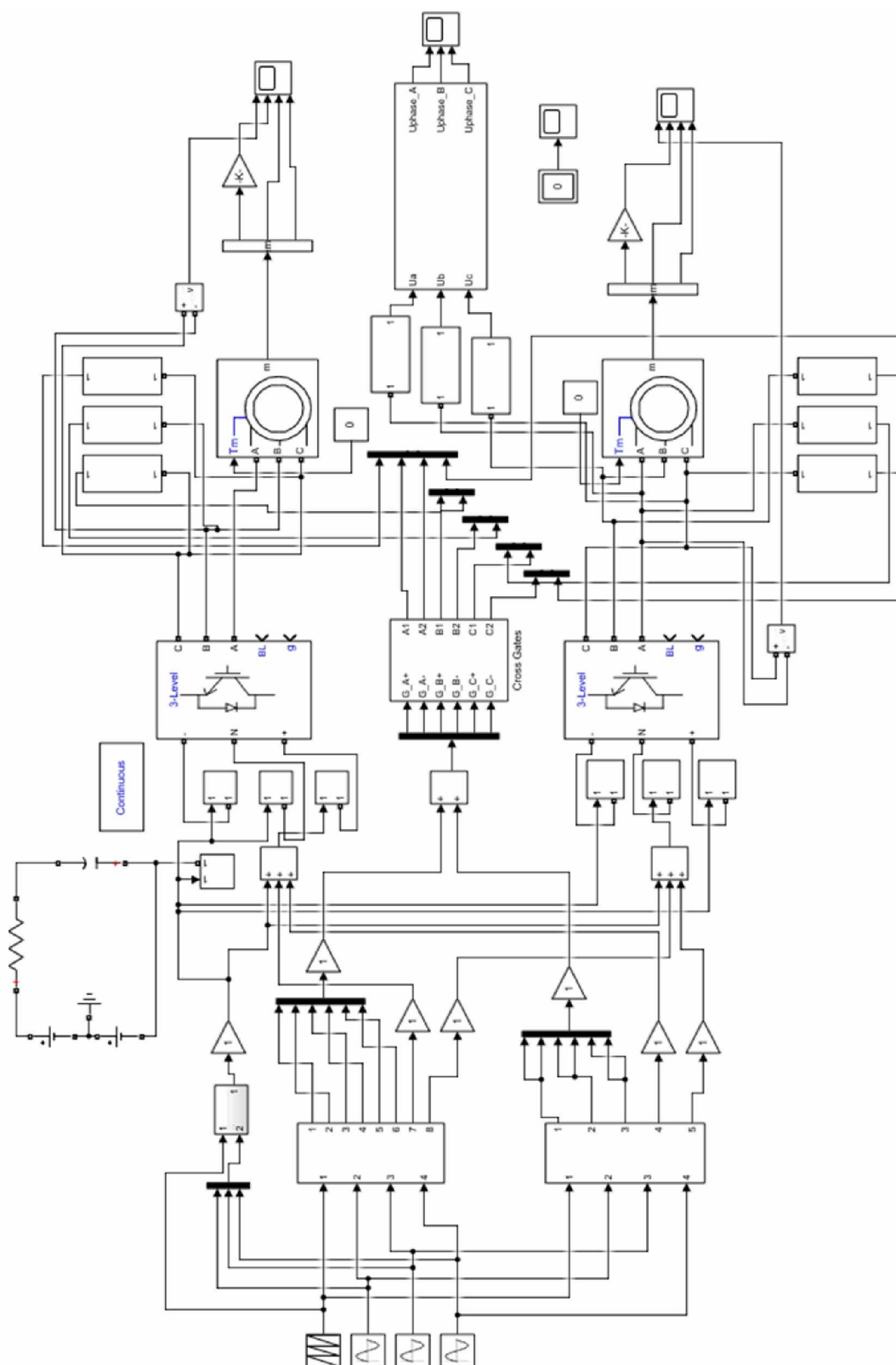
12. Polinder, H., Hoeijmakers, M. J., & Scuiller, F. (2013). Electric Machines and Drives. Springer.
13. Watanabe, T., & Yamashita, M. (2001). A novel anti-slip control without speed sensor for electric railway vehicles. Proceedings of the European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 1-8.
14. Volkov, A., & Maly, V. (2017). Energy efficiency of mine accumulator locomotives. E3S Web of Conferences, 21, 01015.
15. Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., & Blaabjerg, F. (Eds.). (2002). Control in Power Electronics: Selected Problems. Academic Press.
16. Pletz, M., Daves, W., & Yao, J. (2014). Modelling of the wheel/rail adhesion under transient conditions. Wear, 314(1-2), 170-175.
17. Engel, B., & De Doncker, R. W. (2019). Control of Electric Drives. Springer.
18. Barrero, F., Gonzalez, A., Torralba, A., Galvan, E., & Franquelo, L. G. (2001). Speed control of induction motors using a novel fuzzy sliding-mode structure. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 10(3), 375-383.
19. Sharaf, A. M., & El-Gammal, A. A. A. (2009). A novel PID speed controller for mine electric vehicles. Proceedings of the International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 1-6.
20. IEEE. (2014). IEEE Guide for the Testing, Design, Installation, and Maintenance of Electrical Resistance Heat Tracing for Commercial Applications (Standard context adapted for traction control environments). IEEE Standards Association.
21. Bose, B. K. (2020). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends (2nd ed.). Academic Press.

22. Steimel, A. (2012). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag.
23. Emadi, A. (Ed.). (2017). Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives. CRC Press.
24. Novak, T., & Sottile, J. (2011). Advanced control strategies for battery-powered underground mining vehicles. IEEE Transactions on Industry Applications, 47(6), 2634-2642.
25. Pugi, L., Rindi, S., & Ercole, G. (2013). Modelling and simulation of harsh environment industrial locomotives: Adhesion and traction control. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 20(1), 54-76.
26. Chen, Z., & Gao, Y. (2018). Optimization of energy management and regenerative braking algorithms for battery-electric mining locomotives. Energy Conversion and Management, 164, 46-55.
27. Kadowaki, S., & Ohishi, K. (2003). Anti-slip readhesion control of electric motor coach based on disturbance observer. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 50(4), 856-863.
28. Schenk, J., & Miller, G. (2014). Energy-efficient automated control algorithms for battery-powered mining locomotives. Journal of Cleaner Production, 52, 210-218.
29. Pichlik, P., & Zdenek, J. (2014). Overview of slip control methods used in locomotives. Transactions on Electrical Engineering, 3(2), 48-53.
30. Spagnolo, A., & Pugi, L. (2016). Real-time simulation and optimization of traction drives for light rail and industrial vehicles. Simulation Modelling Practice and Theory, 60, 114-131.
31. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles (3rd ed.). CRC Press.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-15	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

32. Xu, X., & Dong, P. (2019). Adhesion control algorithm for electric locomotives based on fuzzy sliding mode control. IEEE Access, 7, 102142-102153.
33. Halepoto, I. A., & Sahito, A. A. (2015). Microcontroller based chopper control system for battery operated traction drive. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 5(6), 1335-1342.
34. Leonhard, W. (2001). Control of Electrical Drives (3rd ed.). Springer.
35. Chadwick, B., & Gurgenci, H. (2012). Simulation-based performance optimization of underground electric haulage systems. Mining Technology, 121(1), 15-24.

Схема системи керування електроприводом електровоза АМ8Д



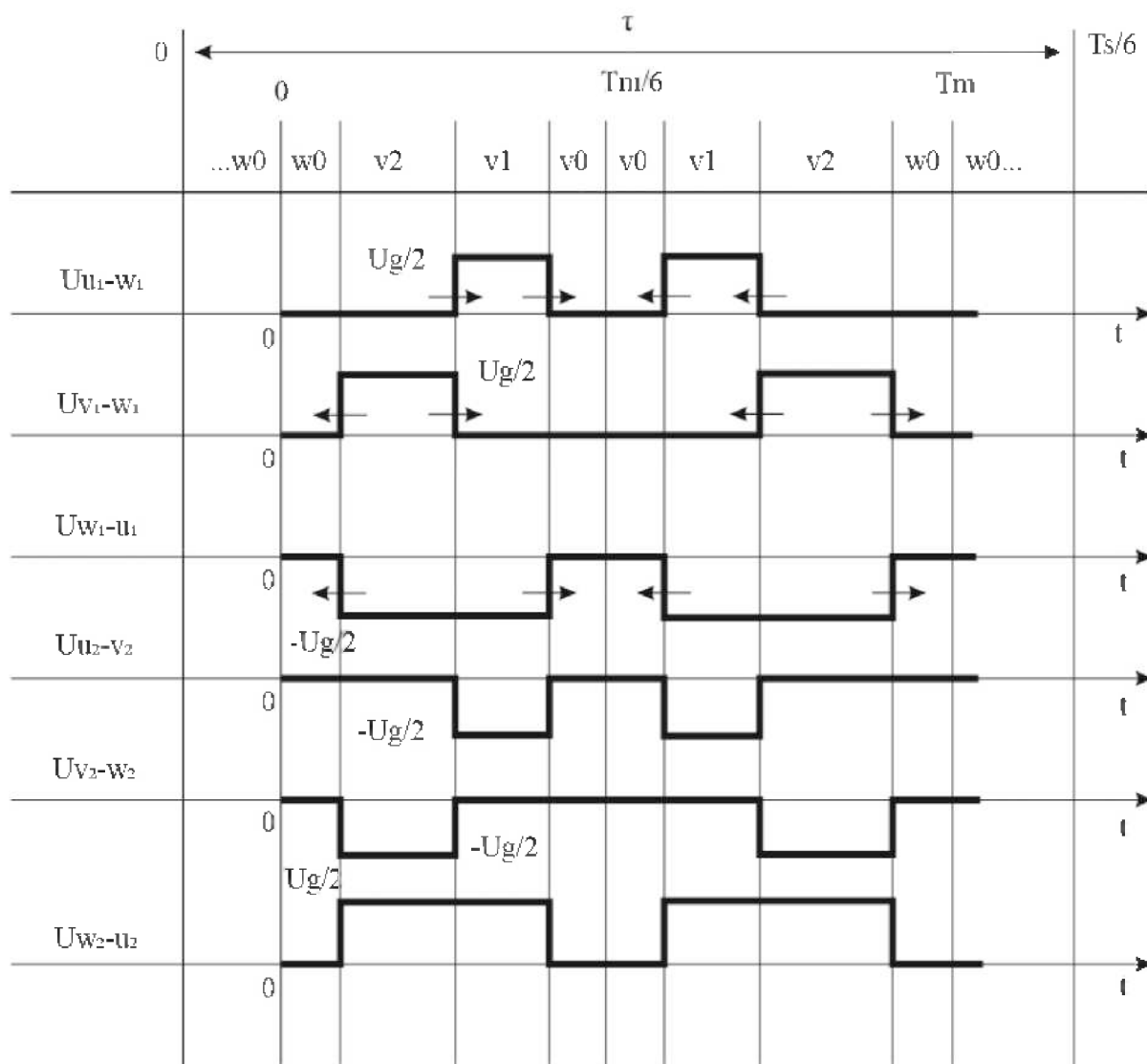
Стан ключів перетворювача

Позначення стану перетворювача	Увімкнені діоди, тиристори, транзистори					
V0	VSU	VSU	VSU			
V1	V.PU1	VSU	VSU	V.MU2		
V2	V.PU1	V.PV1	VSU	V.MU2	V.MV2	
V3	VSU	V.PV1	V.PW1		V.MV2	
V4	VSU	V.PV1	V.PW1		V.MV2	V.MW2
V5	VSU	VSU	V.PW1			V.MW2
V6	V.PU1	VSU	V.PW1	V.MU2		V.MW2
W0	V.PU1	V.PV1	V.PW1	V.MU2	V.MV2	V.MW2
W1	V.PU1	V.MV1	V.MW1	V.MU2	V.PV2	V.PW2
W2	V.PU1	V.PV1	V.MW1	V.MU2	V.PV2	V.PW2
W3	V.MU1	V.PV1	V.MW1	V.PU2	V.MV2	V.PW2
W4	V.MU1	V.PV1	V.PW1	V.PU2	V.MV2	V.MW2
W5	V.MU1	V.MV1	V.PW1	V.PU2	V.MV2	V.MW2
W6	V.PU1	V.MV1	V.PW1	V.MU2	V.PV2	V.MW2

Алгоритми модуляції на двох рівнях регулювання напруги двигунів

Позначення інтервалів перемикання фаз АД			τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6
Межі інтервалів			$0 \dots \frac{T_s}{6}$	$\frac{T_s}{6} \dots \frac{T_s}{3}$	$\frac{T_s}{3} \dots \frac{T_s}{2}$	$\frac{T_s}{2} \dots \frac{2T_s}{3}$	$\frac{2T_s}{3} \dots \frac{5T_s}{6}$	$\frac{5T_s}{6} \dots T_s$
Алгоритми модуляції	1 рівень	$\left[0 \dots \frac{T_m}{2}\right]$	w0- v2- v1-v0	w0-v2- v3-v0	w0- v4-v3- v0	w0-v4- v5-v0	w 0-v6-v5- v0	w 0-v6- v1-v0
		$\left[\frac{T_m}{2} \dots T_m\right]$	v0- v2- v3-w0	v0-v3- v2-w0	v0-v3- v4-w0	v0-v5- v4-w0	v 0-v5-v6- w0	v 0-v1- v6-w0
	2 рівень	$\left[0 \dots \frac{T_m}{2}\right]$	v2- w2- v2-w2	v3-w3- v3-w3	v4- w4- v4-w4	v5-w5- v5-w5	v 6-w6-v5- w6	v 1-w1- v1-w1
		$\left[\frac{T_m}{2} \dots T_m\right]$	w2- v2- w2-v2	w3-v3- w3-v3	w4- v4- w4-v4	w5-v5- w5-v5	w 6-v6-w6- v6	w 1-v1- w1-v1

Діаграми напруг отримані в пусковому режимі



Перехідні процеси у системі електроприводу електровоза АМ8Д

