

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

«Модернізація системи керування тягового електропривода шахтного електровоза»

Виконав: студент 4 курсу, гр. ЕМСА-216
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Павло ТОПОЛЬНИЦЬКИЙ
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри КЕМСК
Володимир БОГАЧУК
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

« 17 » 06 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доц., доцент кафедри
Євген Валентинович О.В.
(прізвище та ініціали)

« 10 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри 06

« 03 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет

Факультет Електроенергетики та електромеханіки

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачкафедри

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

“ 18 ” 02 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Топольницькому Павлу Валерійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модернізація системи керування тягового електропривода шахтного електровоза

Керівник роботи Богачук Володими Васильович, к.т.н., доц. каф.КЕМСК
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом вищого навчального закладу від “20” березня 2025 року №97

2. Термін подання студентом роботи 03.06.2025р.

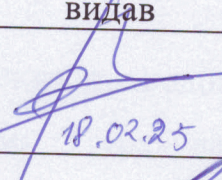
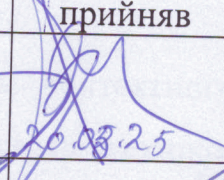
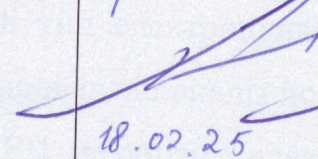
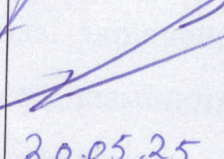
3. Вихідні дані до роботи: Зчіпна маса, кг – 10000, Прискорення вільного падіння, м/с² - 9,8, Діаметр ходового колеса, м - 0,8, Швидкість переміщення, м/с - 0,85, ККД механізму при номінальному навантаженні - 0,8, Коефіцієнт тертя ковзання - 0,1, Коефіцієнт тертя кочення - 0,02, Коефіцієнт тертя реборд ходового колеса об рейки - 1,75, Тривалість ввімкнення, % - 25, Граничне прискорення, м/с² - 0,5, Кількість електродвигунів, шт - 2

4. Зміст текстової частини: Коротка характеристика виробничого механізму і режимів його роботи. Розрахунок потужності двигуна. Техніко-економічне обґрунтування вибору системи електропривода. Вибір електродвигуна. Розробка схеми електричної структурної системи електропривода та розрахунок і вибір елементів її силового кола. Розробка схеми електричної принципової системи електропривода. Математична модель саеп електровоза. Розрахунок динамічних характеристик саеп. Охорона праці. Висновки

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Загальна характеристика, будова, особливості механізму. Кінематика електропривода. Розрахунок потужності двигуна, побудова тахограми механізму. Техніко-економічне обґрунтування вибору СЕП. Вибір двигуна та його перевірка. Протитип системи керування ЕП шахтного електровоза. Розробка схеми електричної структурної САЕП. Схема електрична структурна керування ЕП

ескалатора. Схема електрична принципова керування ЕП. Дослідження динамічних характеристик СЕП. Висновки по роботі.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	к. т. н., доц. каф. КЕМСК Богачук В.В.	 18.02.25	 20.05.25
Охорона праці	Зав. каф. БЖДПБ, д.пед.н., проф. Кобилянський О. В.	 18.02.25	 20.05.25

7. Дата видачі завдання 18.02.25

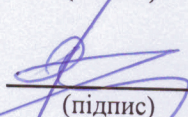
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми бакалаврської дипломної роботи (БДР)	18.02.25	вик
2	Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БДР	06.05.25	вик
3	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР	20.05.25	вик
4	Виконання розділу «Охорона праці»	20.05.25	вик
5	Попередній захист БДР	03.06.25	вик
6	Нормоконтроль БДР	03.06.25	вик
7	Рецензування БДР	10.06.25	вик
8	Захист БДР	19.06.25	вик

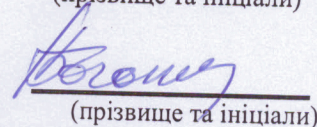
Студент


(підпис)

Керівник роботи


(підпис)

Топольницький
(прізвище та ініціали)


(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська дипломна робота складається з 106 сторінки формату А4, на яких є 19 рисунків, 10 таблиць, список використаних джерел містить 21 найменування.

Виконано модернізацію системи управління електроприводом контактного шахтного електровоза, що працює на змінному струмі. З урахуванням техніко-економічного обґрунтування обрано оптимальний тип електропривода, здійснено підбір і розрахунок відповідного електродвигуна, проведено аналіз його динамічних характеристик. Розроблено електричні схеми САЕП механізму електроприводу із використанням мікропроцесорної системи керування типу МСКЕ. Також визначено комплекс заходів щодо безпечної експлуатації системи електропривода та сформульовано правила охорони праці для персоналу, який здійснює технічне обслуговування і експлуатацію електровоза.

Ключові слова: електропривод, електровоз, регулювання, мікропроцесор, схема електрична принципова, моделювання.

ABSTRACT

The bachelor's thesis consists of 106 pages of A4 format, on which there are 19 figures, 10 tables, the list of used sources contains 23 names.

The electric drive control system of a mine electric locomotive operating on alternating current has been modernized. Taking into account the feasibility study, the optimal type of electric drive has been selected, the corresponding electric motor has been selected and calculated, and its dynamic characteristics have been analyzed. The electrical diagrams of the SAEP of the electric drive mechanism have been developed using a microprocessor control system of the MSCE type. A set of measures for the safe operation of the electric drive system has also been determined and labor protection rules have been formulated for personnel performing maintenance and operation of the electric locomotive.

Keywords: electric drive, electric locomotive, regulation, microprocessor, electrical schematic diagram, modeling.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИРОБНИЧОГО МЕХАНІЗМУ І РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ.....	9
1.1 Загальна характеристика об'єкту дослідження	9
1.2 Класифікація електровозів рудничної галузі та їх основні характеристики	12
1.3 Технічні характеристики досліджуваного шахтного електровозу.....	14
1.4 Математична модель механічної частини електровозу.....	17
2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА	20
2.1 Особливості розрахунку електропривода	20
2.2 Розрахунок основних величин.....	23
2.3 Тахограма руху робочого органу виробничого механізму	25
2.4 Розрахунок приведених статичних моментів виробничого механізму.....	26
2.5 Попередній розрахунок потужності привідного двигуна.....	28
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	32
3.1 Технічне обґрунтування вибору системи електропривода.....	32
3.2 Економічне обґрунтування вибору системи електропривода.....	34
4 МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА.....	39
4.1 Вибір тягового електродвигуна	39
4.2 Переваги електротяги змінного струму	41
4.3 Аналіз режимів роботи прототипу системи керування з використанням асинхронної тяги	42
4.4 Розробка математичної моделі та схеми електричної структурної системи електропривода шахтного електровоза	45

4.5 Розробка схеми електричної принципової системи електропривода шахтного електровоза	51
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИЙ РЕЖИМІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА ...	58
5.1 Побудова графіків перехідних характеристик.....	58
5.2 Дослідження системи ЕП на стійкість та якість.....	63
6 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	67
ВИСНОВКИ.....	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	83
Додаток А Технічне завдання.....	86
Додаток Б Ілюстративні матеріали.....	92
Додаток В Протокол перевірки кваліфікаційної роботи.....	106

ВСТУП

Актуальність теми. Транспорт, який рухається завдяки використанню тягових електродвигунів, відносять до категорії електричного.

Електровоз (англ. electric locomotive, нім. Elektrolokomotive, рос. электровоз) — це тип локомотива, що працює за рахунок електродвигунів, які живляться електроенергією, що надходить через струмоприймач із контактної мережі [1]. Живлення цієї мережі забезпечується тяговими підстанціями.

Залежно від функціонального призначення електровози поділяють на вантажні, пасажирські та маневрові. Окрім цього, вони класифікуються за типом струму: на ті, що працюють на постійному, та ті, що працюють на змінному струмі.

До основних вимог, які ставляться до електровоза, належать: стабільна та безпечна робота при знижених витратах на транспортування, можливість розвивати високі швидкості, велика провізна спроможність, а також низький рівень шуму задля комфорту пасажирів [1, 2].

У світовому масштабі довжина електрифікованих залізниць перевищує 200 тисяч кілометрів, що становить близько п'ятої частини всієї залізничної мережі. Як правило, це ділянки з великим вантажопотоком, складні гірські траси з численними вигинами та підйомами, а також передмістя мегаполісів, де спостерігається інтенсивний рух електропоїздів.

З моменту появи електричного залізничного транспорту його технічне оснащення зазнало кардинальних змін, хоча основний принцип роботи залишився незмінним. Сьогодні осі локомотивів наводяться в рух за допомогою електричних тягових двигунів, які споживають енергію, вироблену на електростанціях. Електроенергія передається до залізничної інфраструктури через високовольтні лінії, а безпосередньо до рухомого складу – через контактну мережу. У ролі зворотного провідника виступають рейки та ґрунт.

Слід зазначити, що існує три основні типи систем електричної тяги: на постійному струмі, на змінному струмі з пониженою частотою та на змінному струмі промислової частоти (50 Гц). У першій половині ХХ століття, до Другої світової війни, застосовували переважно перші два типи. Третій варіант набув популярності у 1950–1960-х роках, коли активно розвивались технології перетворення енергії та системи управління електроприводами.

У системах постійного струму до струмоприймачів електропоїздів підводиться напруга близько 3000 В (в окремих країнах – 1500 В або навіть нижче). Таку напругу забезпечують тягові підстанції, де змінний струм високої напруги, що надходить з енергосистем, спочатку понижується, а потім випрямляється за допомогою потужних напівпровідникових пристроїв.

Локомотивний транспорт відіграє ключову роль у шахтах гірничодобувної галузі. Його використовують для транспортування як основних, так і допоміжних вантажів, перевезення працівників, а також виконання маневрових операцій. Такий тип транспортування — локомотивна відкочування — зазвичай застосовується у гірничих виробках із певним кутом нахилу до 5° / 00.

У шахтному транспорті використовують декілька типів локомотивів, серед яких:

- електровози, що працюють на постійному струмі, з живленням від акумуляторів або контактної мережі;
- електровози змінного струму з підвищеною частотою, які здійснюють безконтактне отримання енергії з живильної лінії (інколи їх помилково називають "високочастотними електровозами");
- гіровози — інерційні локомотиви, що накопичують енергію за допомогою маховиків;
- локомотиви з дизельним приводом (дизелевози) [1, 2].

Об'єктом дослідження бакалаврської кваліфікаційної роботи є процеси, що протікають у електротехнічній системі керування електропривода шахтного електровоза.

Предметом дослідження бакалаврської кваліфікаційної роботи є характеристики та режими роботи електропривода шахтного електровоза та його системи керування.

Методи дослідження. З метою досягнення визначеної цілі було застосовано метод математичного аналізу, за допомогою якого здійснювався підбір усіх необхідних елементів та побудова математичної моделі системи. Це дало можливість проаналізувати процеси, що відбуваються як у системі загалом, так і в її окремих компонентах.

Мета і задачі дослідження. Метою ю цього дослідження є підвищення ефективності роботи системи електропривода електровоза шляхом її модернізації, зокрема вдосконалення як самого електропривода, так і системи керування тяговими двигунами змінного струму. Об'єктом дослідження обрано електровоз моделі 7КА, який є одним із найбільш поширених транспортних засобів, що використовуються для перевезень у шахтних умовах.

Для досягнення цієї мети потрібно розв'язати наступні задачі:

1. Провести аналіз основних технічних та експлуатаційних параметрів обраного об'єкта дослідження.
2. Виконати додаткові інженерні розрахунки для визначення необхідної потужності тягових двигунів, а також побудувати навантажувальну характеристику електропривода.
3. Оцінити економічну ефективність впровадження оптимального з технічної та фінансової точки зору варіанту електроприводної системи для електровоза моделі 7КА.
4. Обґрунтувати вибір сучасної системи керування для електровоза типу 7КА, яка базується на застосуванні асинхронних двигунів змінного

струму та заміні застарілої релейної автоматики на мікропроцесорне керування. Очікується, що така модернізація забезпечить вищу надійність, гнучкість налаштування та зниження енерговитрат електропривода.

5. Здійснити комп'ютерне моделювання запропонованої системи керування з метою перевірки її відповідності фізичним і електромеханічним процесам у реальних умовах експлуатації.

6. Розробити рекомендації з безпечної експлуатації шахтного електровоза з урахуванням шкідливих факторів, характерних для промислового середовища.

1 КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИРОБНИЧОГО МЕХАНІЗМУ І РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ

1.1 Загальна характеристика об'єкту дослідження

Залізорудна сировина (ЗРС), яку видобувають на українських гірничорудних підприємствах, забезпечує до 70% щорічних валютних надходжень країни, виступаючи одним із основних джерел наповнення золотовалютного резерву [1]. Однак, на жаль, собівартість її видобутку щороку зростає, що негативно впливає на конкурентоспроможність цього стратегічного експортного ресурсу [2]. Одним із ключових чинників зростання витрат є підвищення енергоспоживання, частка якого перевищує третину у структурі загальної собівартості ЗРС. Це стосується всіх етапів виробничого циклу — від видобування до транспортування, незалежно від того, чи використовується відкритий (кар'єрний), чи підземний (шахтний) спосіб видобутку [2].

На відміну від відкритого способу видобутку, шахтний метод характеризується значно вищими витратами електроенергії — вони становлять близько 90% усіх енерговитрат. Зокрема, до 16% припадає на енергоспоживання внутрішньошахтного транспорту (ВШТ), до складу якого входить орієнтовно чотири тисячі електровозів, переважно оснащених застарілим та енерговитратним обладнанням.

Ще однією суттєвою проблемою, яка ускладнює експлуатацію ВШТ, є постійне зростання витрат гірничодобувних підприємств на технічне обслуговування і ремонт електрорухомого складу [2].

Як свідчить аналіз пошкоджень компонентів тягових електромеханічних комплексів (ТЕМК), які використовуються в рудникових контактних електровозах (див. рис. 1 та рис. 2), характер відмов змінюється з часом. Проте основною тенденцією залишається істотне зростання витрат на відновлення тягових електродвигунів (ТЕД). Зокрема, на підприємствах Кривого Рогу протягом останніх десяти років ці витрати збільшилися майже

вчетверо і наразі перевищують 90% усіх витрат, пов'язаних з ремонтом тягового електрообладнання [2].

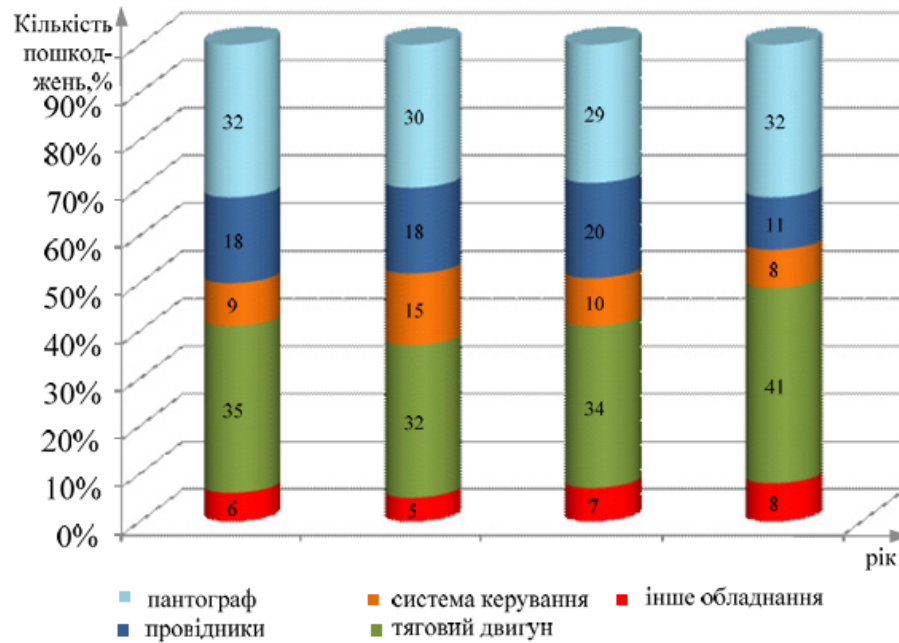


Рисунок 1.1 – Динаміка зміни показників кількостей пошкоджень основних елементів тягового електроустаткування рудникових електро возів 7КА

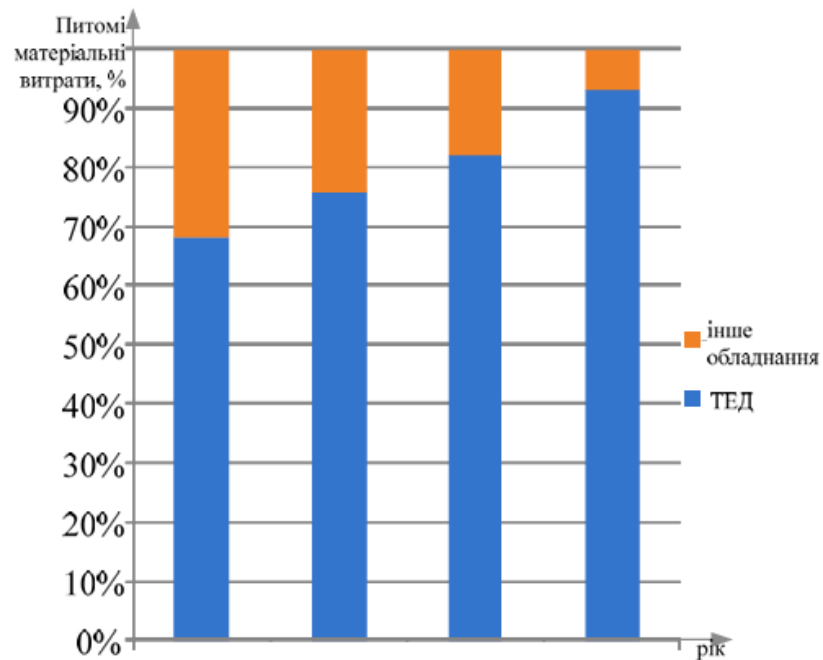


Рисунок 1.2 – Динаміка зміни питомих матеріальних витрат на ремонт тягового електроустаткування рудникових електро возів

Поточна ситуація вимагає проведення детального аналізу цього процесу та розробки практичних, сучасних і обґрунтованих рекомендацій для подолання існуючих проблем [3; 4].

Оптимізація факторів, що впливають на неефективність роботи тягових електромеханічних комплексів (ТЕМК) та підвищення їх надійності в експлуатації, а також поліпшення роботи електропоїздів загалом, можлива лише через створення та впровадження сучасних систем управління. Ці системи повинні забезпечувати безперервний моніторинг стану електричних і технологічних параметрів тягового обладнання. Важливо враховувати, що ТЕМК електровозів, особливо рудникових (шахтних) моделей, є складними багатофункціональними системами, в яких існує велика кількість параметрів, що підлягають контролю [3-5].

Рейковий підземний транспорт широко застосовується в гірничорудній галузі завдяки своїй високій ефективності при перевезенні вантажів на великі відстані. Завдяки впровадженню нових технологічних рішень і модернізації шахтних транспортних ліній, ця сфера залишається актуальною і затребуваною.

Модернізація галузі спрямована на підвищення продуктивності шляхом вдосконалення конструкції вагонеток, впровадження двосистемних контактно-акумуляторних електровозів, а також монорейкових транспортних систем. Одним із стримуючих факторів розвитку локомотивної відкатки є застосування двигунів постійного струму послідовного збудження з реостатно-контакторною системою керування. Незважаючи на численні переваги та великий практичний досвід експлуатації такого обладнання в шахтному підземному транспорті, дана схема має ряд істотних недоліків:

- Значні енергетичні втрати у силових режимах як під час запуску, так і при гальмуванні через відсутність можливості рекуперативного гальмування.

- М'яка механічна характеристика тягового приводу у поєднанні з реостатно-контакторним керуванням ускладнює підтримку стабільної швидкості електровоза в режимах статичної роботи.

- Конструктивна особливість тягових двигунів постійного струму — щітково-колекторний механізм — обмежує їх надійність, ускладнює обслуговування і створює проблеми для застосування в шахтах із вибухонебезпечною атмосферою.

- Відсутність ефективних засобів захисту від пробуксовки і юза [1–3].

1.2 Класифікація електровозів рудничної галузі та їх основні характеристики

Шахтні локомотиви класифікуються за видами виконання: рудничні нормальні (РН) — це контактні електровози; рудничні підвищеної надійності (РП) — акумуляторні електровози та електровози змінного струму; рудничні вибухозахищені (РВ) — гіровози, вибухозахищені акумуляторні електровози і вибухозахищені дизель-локомотиви. Застосування локомотивів із різним ступенем вибухозахисту регламентується правилами безпеки (ПБ).

За показником зчіпної сили локомотиви діляться на легкі (до 50 кН), середні (від 50 до 140 кН) та важкі (понад 140 кН).

Вибір локомотивів різної маси залежить від умов експлуатації:

- для вентиляційних виробок, горизонтів та дільничних виробок (підповерхових і поверхових штреків) рекомендується використовувати локомотиви масою 7–10 тонн;

- для основних горизонтів — локомотиви масою 14–28 тонн при ширині колії 750 або 900 мм, і 7–10 тонн при ширині колії 600 мм.

До основних переваг локомотивного транспорту належать: багатофункціональність, практично необмежена продуктивність, що визначається кількістю локомотивів у роботі; висока економічність; маневреність; можливість організовувати роздільне та безперевантажувальне

перевезення вантажів по розгалуженій мережі на великі відстані; а також високий коефіцієнт готовності відкатки.

Серед недоліків локомотивного транспорту варто відзначити циклічність роботи, залежність продуктивності від рівня організації процесу, обмеження щодо кутів нахилу трас, ускладнення забезпечення безпеки при підвищених профілях шляху, а також необхідність складної акумуляторної інфраструктури у випадку застосування акумуляторних електровозів.

Вибір локомотива, що відповідає вимогам вибухозахисту шахт, здійснюється на основі техніко-економічного аналізу, з урахуванням мінімізації приведених витрат на локомотивну відкатку. Основними факторами, які впливають на вибір маси локомотива, типу та вантажопідйомності транспортного засобу, є виробнича потужність шахти (горизонту) та відстань перевезень.

Рудничні електровози постійного струму мають такі особливості: контактні електровози найбільш широко застосовуються на рудниках чорної та кольорової металургії, тоді як акумуляторні електровози, що становлять близько 80% загального парку локомотивів, використовуються переважно на вугільних шахтах.

Контактні електровози живляться від контактної мережі постійного струму з напругою 250 В, а акумуляторні електровози працюють від тягових акумуляторних батарей шахти.

На основі аналізу переваг і недоліків різних типів локомотивів, геологічних особливостей шахти та перспектив розвитку гірничодобувної галузі сформовано типорозмірний ряд шахтних локомотивів, розподілених за категоріями вибухозахисту.

До типорозмірного ряду належать такі типи електровозів:

- акумуляторні АК-2У, 4,5АРП-2М, 5АРВ2М, АРП7, АРВ7, АМ-8Д, 2АМ-8Д, АРП10, АРП14, АРП28;
- контактні електровози 3кр-600, 4КР1, 7КР-1У, К10, К14, КТ14, КТ28.

За останні роки електровози зазнали значної модернізації, а також були розроблені нові моделі різними підприємствами. Зокрема, Олександрівський машинобудівний завод виготовляє рудничні контактні електровози моделей К4, 7КРМ1, К10 та К14. Новочеркаський електровозобудівний завод випускає контактні шахтні електровози КН10, а також рудничні контактні електровози екран-600 з масою 3,3 тонни та шириною колії 600 мм.

Ясногорський машинобудівний завод виробляє акумуляторні електровози серій АРП-7 та АРВ-7, а також акумуляторні електровози серії А5,5 (маса 5,5 т, тягове зусилля 9–9,5 кН, виконання РП), А8 (виконання РП) та В8 (виконання РВ). Також у виробництві є спарені акумуляторні електровози серій 2А8 і 2В8.

Дружківський машинобудівний завод випускає акумуляторні електровози серій АМ8Д, 2АМ8Д, АРП-10 і АРП-14, а також контактні електровози ЕК10Т з тиристорною системою управління та ЕК10Р з реостатною системою управління [3–4].

1.3 Технічні характеристики досліджуваного шахтного електровозу

Контактний електровоз моделі 7КА (аналоги — 7КР, 7КРМ1) призначений для перевезення поїздів у підземних шахтних виробках і копальнях з ухилом до 0,005 та радіусом кривих рейкових колій не менше 12 метрів. Він експлуатується в умовах, дозволених чинними правилами безпеки для контактних електровозів. Виготовлення електровоза здійснюється відповідно до технічних умов ТУ У35.2-25103132-007:2006.

Зовнішній вигляд шахтного електровоза 7КА наведено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Контактний електровоз 7КА

Основні технічні характеристики електровоза приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики електровоза 7КА

№ п/п	Найменування основних параметрів та розмірів	Од. вим.	Показник
1.	Зчіпна маса	кг	10000
2.	Номінальна напруга на струмоприймачі	В	250+75/-50
3.	Швидкість при годинному режимі	км/ч	12,2
4.	Потужність електродвигунів в годинному режимі	кВт	2x33
5.	Тягове зусилля в годинному режимі	кН	18
6.	Ширина колії	мм	600/750,900
7.	Довжина по буферам	мм	4600
8.	Ширина по виступаючим частинам:		
	-для колії 600	мм	1050
	-для колії 750		1350
	-для колії 900		1350
9.	Висота по кабіні машиніста	мм	1550
10.	Жорстка база	мм	1200
11.	Кліренс (дорожній просвіт)	мм	115
12.	Зовнішній діаметр бандажу	мм	680

До складу електровоза входять такі основні системи:

- механічне обладнання, що включає раму, ходову частину, ресорне підвішування, гальмівний механізм та пісочну установку;
- пневматичне обладнання, яке містить компресор із електродвигуном, що приводить в дію пневматичні гальма, пісочницю, пневмосигнал і струмоприймач;
- електричне обладнання, що охоплює тягові двигуни, систему живлення та пускорегулюючу апаратуру.

Електрична частина електровоза включає тягові двигуни постійного струму послідовного збудження, контролери, пускові реостати, захисне та освітлювальне обладнання. Контактний електровоз оснащений струмознімачами, а також додатковими тяговими акумуляторними батареями.

Робота електровоза проходить у двох режимах: тяги та холостого ходу. У режимі холостого ходу (режим вибігу) тяговий привід не активний, а рух здійснюється за інерцією, тому цей режим у подальшому не розглядається.

Режим тяги визначається сумарним навантаженням та швидкістю руху тягової установки. Для моделювання процесу руху необхідно врахувати як механічні, так і електричні компоненти моделі тягової установки [5].

Під час руху на перегоні електровоз зайнятий приблизно 28% часу зміни, а під час виконання допоміжних та маневрових операцій — близько 19,2% (зокрема, навантаження та розвантаження вагонеток, відновлення вагонів, що зійшли з рейок, формування складу на маневрових ділянках) [20]. Решту часу займають простой, пов'язані з організаційно-технічними заходами, такими як заготівля піску або технічний огляд силових агрегатів електровоза. Крім того, тривалість маневрових операцій становить 33,6% від загального часу роботи електродвигуна, при цьому за одну годину спостерігається понад 700 перемикань контролера. Це свідчить про значну кількість динамічних режимів роботи електроприводу.

1.4 Математична модель механічної частини електровозу

Рівняння руху електровоза у диференціальній формі встановлюють залежність між швидкістю руху v , часом t та пройденою відстанню, що дозволяє визначити характер руху електровоза у вигляді функції $v(t)$.

На рисунку 1.4 наведено загальну кінематичну схему шахтного електровоза.

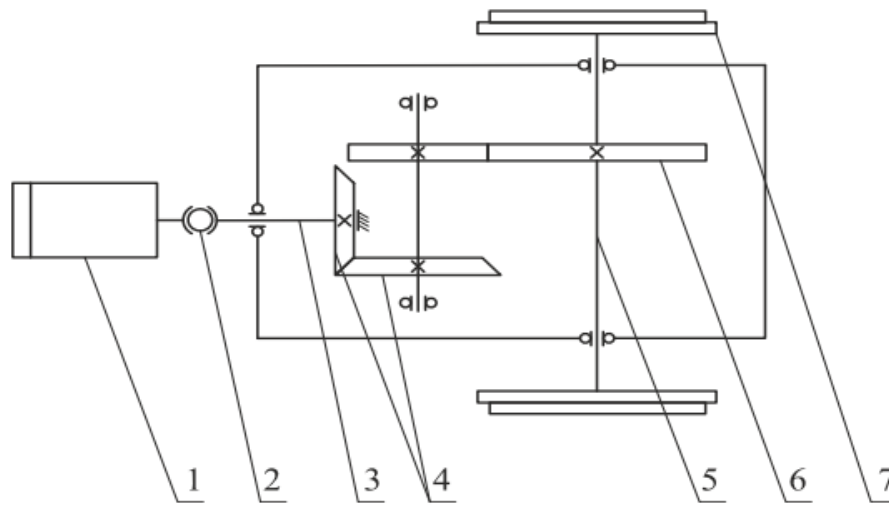


Рисунок 1.4 – Загальна кінематична схема шахтного електровозу

На рисунку 1.4 наведені такі позначення:

- 1 – тяговий електричний двигун;
- 2 – гнучка муфта;
- 3 – вал провідної кінчної шестірні;
- 4 – пара кінчних шестірень;
- 5 – вісь колісної пари;
- 6 – пара циліндричних шестірень;
- 7 – колеса електровоза.

Для спрощення математичного опису динаміки руху електровоза приймаються такі допущення:

- кочення коліс по рейках відбувається як рух абсолютно твердого тіла, без деформації матеріалу й проковзування;

- зубчаста передача — прямозуба;
- шестерня й зубчасте колесо жорстко закріплені на валу тягового двигуна і осі колісної пари відповідно;
- інерційністю якоря двигуна, зубчастої передачі й колісної пари знехтувати;
- не враховується перерозподіл навантажень між рушійними осями та динамічні навантаження від коливань обресорених мас;
- не враховується розсіювання енергії через дисипативні сили.

На рисунку 1.5 показана схема моментів інерції, що діють на механічну систему електровоза.

Для повного опису динаміки руху необхідно визначити моменти інерції обертових частин. Чисельне значення коефіцієнта інерції $(1+\gamma_e)$ можна обчислити, скориставшись рівнянням еквівалентної маси електровоза [3–5].

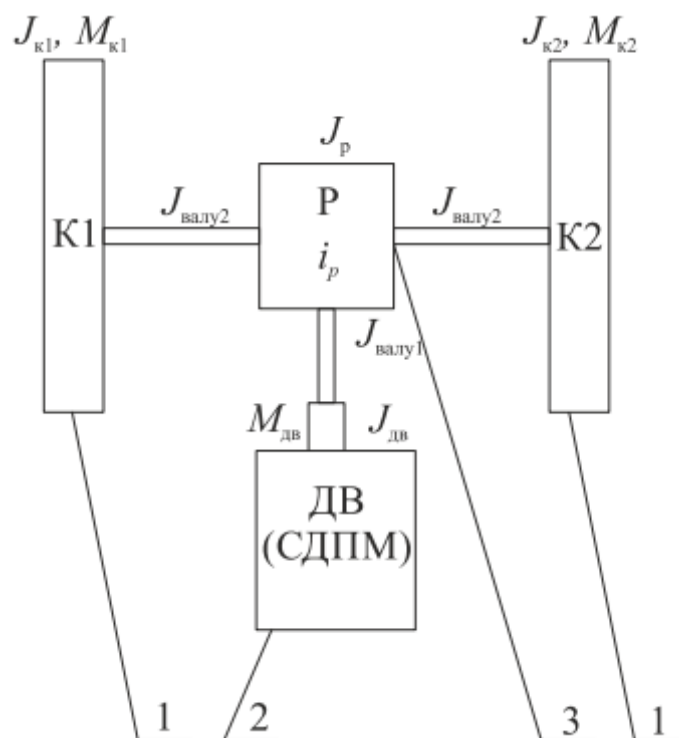


Рисунок 1.5 – Схема моментів інерції, що діють на механічну систему електровозу: 1 – приводні колісні пари; 2 – якорь двигуна; 3 – вали редуктора.

Частини електровозу, що обертаються мають циліндричну форму, внаслідок чого відношення радіусів інерцій ρ до фізичних радіусів R механізмів, що обертаються, досить стабільні, тому коефіцієнт інерції $(1+\gamma_e)$ на практиці визначають на підставі експериментальних даних згідно.

Висновок: Розглянуто основні технічні характеристики електровоза 7КА, який розглядається в даній роботі як об'єкт дослідження. Надалі буде розглядатися система електроприводу контактного електровозу 7КА із врахуванням можливості її побудови на базі двигунів змінного струму.

2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА

2.1 Особливості розрахунку електропривода

Технічні рішення, ухвалені щодо механічної частини шахтного електровоза, є фундаментом для подальших інженерних розрахунків та визначення оптимального типу електродвигуна, а також вибору відповідної системи електроприводу. Ці дії завершують перший етап розробки автоматизованого електропривода.

Основна мета другого етапу роботи полягає у виборі повного комплекту електропривода, що має відповідати рішенням, прийнятим на попередньому етапі. На цьому етапі відбувається деталізація обраної системи, включаючи узгодження її параметрів із вимогами експлуатаційних характеристик електровоза.

На основі технічних рішень першого та другого етапів здійснюється вибір регуляторів основних параметрів, які визначають ефективність роботи електропривода, таких як струм, швидкість обертання двигуна та положення виконавчих механізмів. Крім того, підбираються інші компоненти системи автоматичного керування, що забезпечують стабільну, надійну та ефективну роботу електропривода в умовах шахтної експлуатації.

Вибір потужності полягає у визначенні номінальної «типової» потужності тягового асинхронного двигуна (ТАД), що дозволяє уникнути перевантажень під час реальної експлуатації, які можуть призвести до неприпустимого перегріву двигуна.

При аналізі тягового електропривода можна виділити два основних параметри потужності: тривалу (номінальну) та годинну. Саме годинна потужність, а також відповідний їй годинний струм, є визначальними класифікаційними характеристиками електродвигуна.

Робоча область електропривода визначається кількістю квадрантів, у яких він може функціонувати на площині координат «швидкість — момент». У випадку нереверсивного приводу — це два квадранти, а для реверсивного

— чотири. Допустима робоча область електропривода наведена на рисунку 2.1, а.:

- область тривалої роботи (заштрихована область) обмежена максимальною швидкістю електроприводу $\omega_{\text{еп макс}}$, рад/с та інтервалом зміни моменту корисного навантаження (наведеним до валу двигуна) у тривалому режимі роботи $M_{\text{смін}} \div M_{\text{смакс}}$, Н м;

- область короткочасної роботи обмежена максимальною швидкістю електроприводу $\omega_{\text{епмакс}}$, рад/с та значенням максимального моменту електроприводу на валу двигуна у пуско-гальмівних режимах $M_{\text{епмакс}}$, Н·м.

Тривалий режим роботи електроприводу відбувається в першому і третьому квадрантах (у заштрихованій області на рис. 2.1, а), а в другому і четвертому квадрантах мають місце тільки короткочасні процеси електричного гальмування Момент опору M_c може бути постійним за значенням при зміні швидкості. $M_c(\omega)$, наприклад, для механізмів з вентиляторним характером навантаження (на рис. 2.1, а показана пунктирною лінією) або механізмів з постійною потужністю на валу (рис. 2.1, б). У другому випадку регулювання швидкості вище значення $\omega_{\text{еп1}}$ здійснюється за рахунок ослаблення потоку збудження двигуна, та система управління електроприводу реалізується як двозонна [27].

Для обґрунтованого вибору електродвигунів необхідно попередньо визначити режими експлуатації та характерні умови роботи тягового електроприводу шахтного електровоза. На основі цього було виконано розрахунок номінального моменту опору на валу електродвигуна, а також приведенного до ротора сумарного моменту інерції.

Аналізуючи наявну технічну літературу та виконавши відповідні розрахунки, визначено момент опору при повному завантаженні електровоза, а також інерційні характеристики всього рухомого складу, приведені до валу виконавчого двигуна. Отримані дані дозволили сформулювати вимоги до тягового електропривода з урахуванням специфіки експлуатації: значна інерція рухомих мас, можливість короткочасних перевантажень, що виникають, зокрема, при зміні ухилу шляху.

У зв'язку з цим ключовими технічними параметрами при виборі електропривода є: забезпечення плавного запуску і зупинки, здатність двигуна витримувати перевантаження, а також висока енергоефективність приводу загалом.

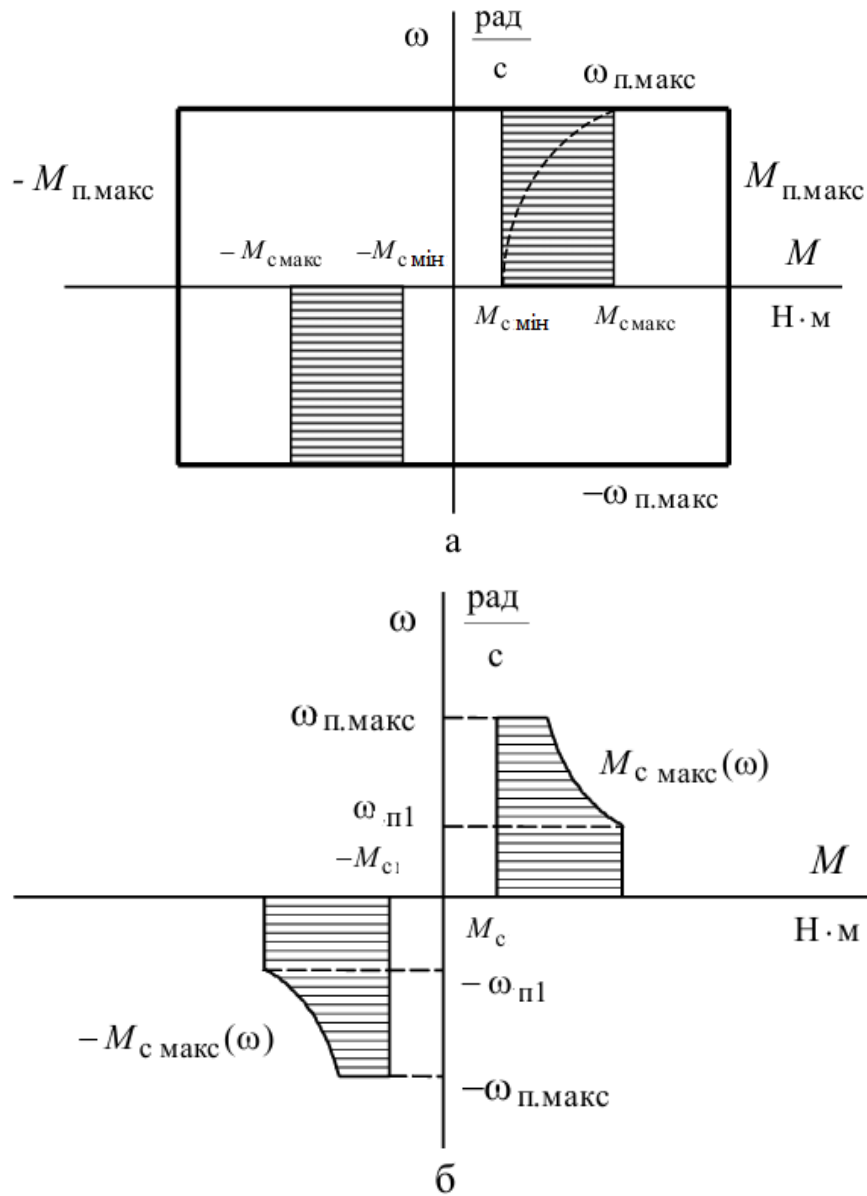


Рисунок 2.1 – Задана сфера роботи електроприводу: а – однозонного електроприводу; б – двозонного електроприводу

2.2 Розрахунок основних величин

Для проведення необхідних інженерних розрахунків спочатку визначимо початкові (вихідні) параметри, які будуть використовуватися у подальших обчисленнях. Основні вхідні характеристики, що потрібні для розрахунку потужності електродвигуна, систематизовано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

№ п/п	Найменування показника, розмірність	Значення показника
1.	Зчіпна маса, кг	10000
2.	Прискорення вільного падіння, м/с ²	9,8
3.	Діаметр ходового колеса, м	0,8
4.	Швидкість переміщення, м/с	0,85
5.	ККД механізму при номінальному навантаженні	0,8
6.	Коефіцієнт тертя ковзання	0,1
7.	Коефіцієнт тертя кочення	0,02
8.	Коефіцієнт тертя реборд ходового колеса об рейки	1,75
9.	Тривалість ввімкнення, %	25
10.	Граничне прискорення, м/с ²	0,5
11.	Кількість електродвигунів, шт	2

Спираючись на практичний досвід проєктування та орієнтовні довідкові значення, попередньо приймаємо розрахункову частоту обертання привідного електродвигуна. Для подальших розрахунків її значення становитиме приблизно: $n_{\text{дов.}} = 700 \text{ об/хв.}$

Відповідне значення кутової швидкості становить:

$$\omega_{\text{дов.}} = 0,1047 \cdot n_{\text{дов.}} = 0,1047 \cdot 700 = 73,29 \text{ (с}^{-1}\text{)}. \quad (2.1)$$

Тоді передаточне число редуктора (з округленням в більшу сторону):

$$i = \frac{\omega_{\text{дов.}} \cdot D_k}{2 \cdot V} = \frac{73,29 \cdot 0,8}{2 \cdot 0,85} = 35. \quad (2.2)$$

Кутова швидкість обертання опорного колеса:

$$\omega_{\dot{\epsilon}} = \frac{2 \cdot V}{D_{\dot{\epsilon}}} = \frac{2 \cdot 0,85}{0,8} = 2,125 (c^{-1}). \quad (2.3)$$

Кутове прискорення двигуна при пуску та гальмуванні:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot \alpha \cdot i}{D_{\kappa}} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 35}{0,8} = 43,75 (rad/c^2). \quad (2.4)$$

ККД механізму для різних значень навантаження визначається аналітичним шляхом за формулою:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{a}{\gamma} + b}, \quad (2.5)$$

де a та b – коефіцієнти постійних та змінних втрат;

γ – коефіцієнт завантаження механізму.

$$\gamma = \frac{m + m_0}{m_{ном} + m_0}, \quad (2.6)$$

де m і $m_{ном.}$ – поточна і номінальна маси вантажу, кг;

m_0 – маса механізму без вантажу, кг.

При номінальному навантаженні механізму ($\gamma = 1$) ККД механізму:

$$\eta_{ном.} = \frac{1}{1 + a + b}. \quad (2.7)$$

При номінальному навантаженні співвідношення коефіцієнтів втрат, відомі із статичних даних:

$$k = \frac{a}{b} = 1,2 \dots 1,5 \approx 1,35.. \quad (2.8)$$

Значення коефіцієнтів a і b можна знайти шляхом сумісного розв'язку системи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{ном.} = \frac{1}{1+a+b} \\ a = k \cdot b \end{array} \right\}. \quad (2.9)$$

Звідси:

$$b = \frac{1 - \eta_{iii}}{\eta_{iii} \cdot (1 + k)} = \frac{1 - 0,8}{0,8 \cdot (1 + 1,35)} = 0,106, \quad (2.10)$$

$$a = k \cdot b = k \cdot \frac{1 - \eta_{iii}}{\eta_{iii} \cdot (1 + k)} = 1,35 \cdot \frac{1 - 0,8}{0,8 \cdot (1 + 1,35)} = 0,144, . \quad (2.11)$$

Коефіцієнт завантаження механізму без навантаження:

$$\gamma_0 = \frac{m_0}{m_{ном.} + m_0} = \frac{74400}{10000 + 74400} = 0,882. \quad (2.12)$$

ККД механізму пересування крану при роботі без навантаження (в режимі холостого ходу):

$$\eta_0 = \frac{1}{1 + \frac{a}{\gamma_0} + b} = \frac{1}{1 + \frac{0,144}{0,882} + 0,106} = 0,788. \quad (2.13)$$

2.3 Тахограма руху робочого органу виробничого механізму

Сумарний час роботи електровоза за цикл роботи:

$$t_{роб.} = \frac{TB\% \cdot t_u}{100} = \frac{20 \cdot 230}{100} = 57,5 (с). \quad (2.14)$$

Сумарний час пауз за цикл роботи:

$$t_0 = t_n - t_{роб.} = \frac{TB\% \cdot t_u}{100} = 230 - 57,5 = 172,5 (с). \quad (2.15)$$

Час паузи на навантаження та розвантаження механізму приймаємо рівними між собою:

$$t_{01} = t_{02} = \frac{t_0}{2} = \frac{172,5}{2} = 86,25 (с). \quad (2.16)$$

Час роботи механізму при пуску та гальмуванні з допустимим прискоренням приймаємо рівними між собою:

$$t_i = t_a = \frac{V}{a} = \frac{0,85}{0,5} = 1,7 (с). \quad (2.17)$$

Сумарний час усталеної роботи механізму за цикл роботи:

$$t_o = t_{\text{діа.}} - 2 \cdot t_i - 2 \cdot t_a = 57,5 - 2 \cdot 1,7 - 2 \cdot 1,7 = 50,7 (с). \quad (2.18)$$

Час усталеної роботи електровоза при переміщенні вантажу та в режимі холостого ходу:

$$t_{1y} = t_{2y} = \frac{t_y}{2} = \frac{50,7}{2} = 25,35 (с). \quad (2.19)$$

2.4 Розрахунок приведених статичних моментів виробничого механізму

У загальному випадку, сили опору руху електровоза при сталому режимі визначаються наступними факторами:

- силами тертя в підшипниках, а також тертям кочення між колесами і рейками, включаючи тертя ковзання гребенів коліс по рейковій поверхні;
- впливом ухилу рейкової колії, по якій відбувається рух транспорту;
- аеродинамічним опором, що виникає через вплив повітряного потоку.

Оскільки у вихідних даних для проєктування відсутня інформація щодо кута нахилу шляху, опір, зумовлений цим чинником, приймається рівним нулю.

Статичний момент опору, що виникає під час роботи електровоза у режимі холостого ходу і зведений до валу двигуна, розраховується як:

$$M_{ст.ХХ} = \frac{m_0 \cdot g \cdot k_{пб} \cdot \frac{(\mu \cdot d_u + 2 \cdot f)}{D_k} \cdot R_k}{i \cdot \eta_0}, \quad (2.20)$$

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

R_k – радіус опорного колеса ($R_k = 0,4 \text{ м}$).

$$M_{ст.ХХ} = \frac{74400 \cdot 9,81 \cdot 1,75 \cdot \frac{(0,1 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,02)}{0,8} \cdot 0,4}{35 \cdot 0,788} = 1274 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Статичний момент опору в режимі номінального навантаження, приведений до валу двигуна:

$$M_{ст.нав.} = \frac{(74400 + 10000) \cdot 9,81 \cdot 1,75 \cdot \frac{(0,1 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,02)}{0,8} \cdot 0,4}{35 \cdot 0,788} = 1423 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (2.21)$$

Оскільки момент інерції ротора привідного електродвигуна є незначним порівняно з моментами інерції як навантаженого, так і ненавантаженого складу, вплив останніх необхідно обов'язково враховувати при проведенні динамічних розрахунків.

На основі виконаних розрахунків будується тахограма руху робочого органу механізму, яка представлена графічно на рисунку 2.1.

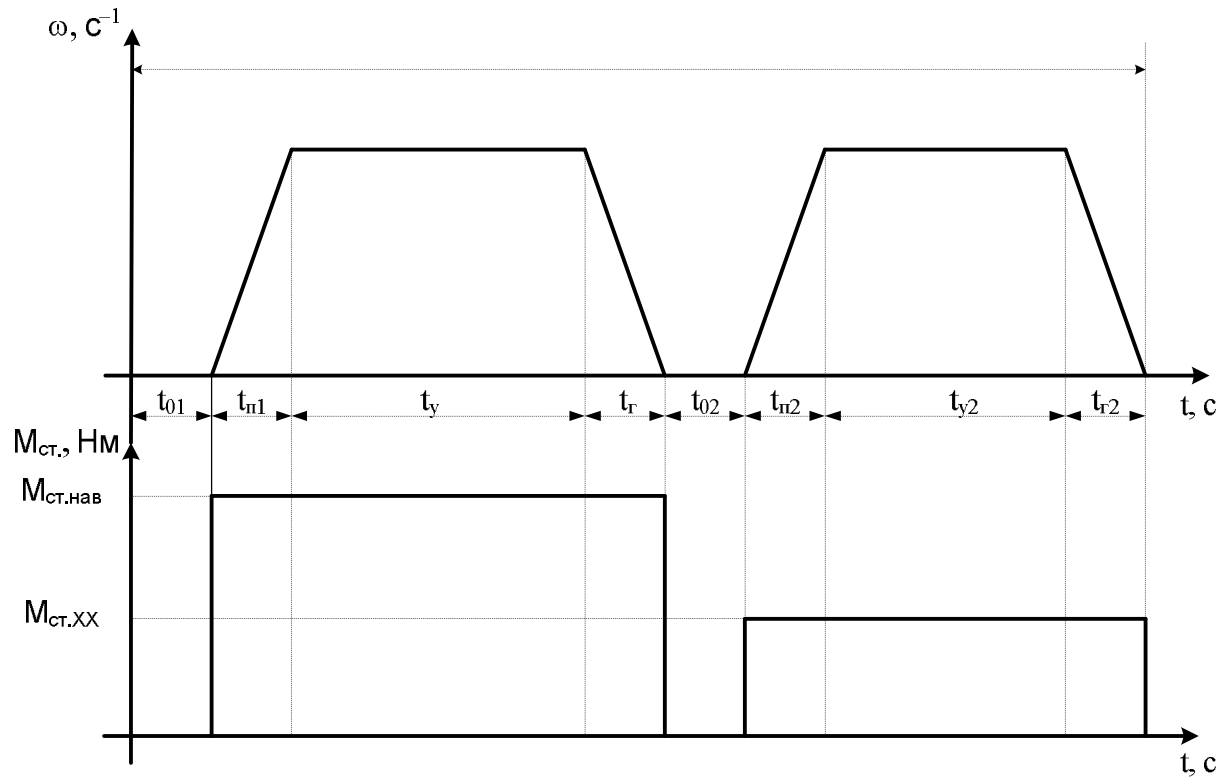


Рисунок 2.1 – Тахограма та статичні моменти механізму пересування шахтного електровоза

2.5 Попередній розрахунок потужності привідного двигуна

У перехідних режимах роботи виникають динамічні моменти, які мають суттєвий вплив на навантаження та необхідну потужність привідного електродвигуна. Тому врахування цих моментів є критично важливим при виконанні точних інженерних розрахунків.

Момент інерції робочого механізму, зведений до валу електродвигуна в режимі холостого ходу (без урахування інерції ротора), визначається наступним чином:

$$J_0 = 2 \cdot J_{ред.} + 4 \cdot \frac{J_k}{i^2} + m_0 \cdot \frac{V^2}{\omega_{дов.}^2}, \quad (2.22)$$

де $J_{ред.}$ – момент інерції редуктора приведений до валу двигуна
 $(J_{ред.} = 0,16 \text{ кг} \cdot \text{м}^2)$

$$J_0 = 2 \cdot 0,16 + 4 \cdot \frac{10,837}{35^2} + 74400 \cdot \frac{0,85^2}{73,29^2} = 10,363 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2 \text{)}.$$

Момент інерції виконавчого механізму, зведений до привідного вала електродвигуна за умови роботи в режимі номінального навантаження (без врахування інерції ротора), визначається за наступним виразом:

$$J_{нав.} = 2 \cdot J_{ред.} + 4 \cdot \frac{J_k}{i^2} + (m_0 + m_n) \cdot \frac{V^2}{\omega_{дов.}^2}, \quad (2.23)$$

$$J_{нав.} = 2 \cdot 0,16 + 4 \cdot \frac{10,837}{35^2} + (74400 + 10000) \cdot \frac{0,85^2}{73,29^2} = 11,708 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2 \text{)}.$$

Динамічний момент при пуску (гальмуванні) в режимі холостого ходу:

$$M_{дин.хх} = J_0 \cdot \varepsilon = 10,363 \cdot 43,75 = 453,372 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Динамічний момент при пуску (гальмуванні) в режимі номінального навантаження:

$$M_{дин.нав.} = J_{нав.} \cdot \varepsilon = 11,708 \cdot 43,75 = 512,219 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Приведені до валу двигуна статичні моменти на ділянках пуску і гальмування електровоза:

- пуск в режимі номінального навантаження:

$$M_{с1} = M_{с.нав.} + M_{дин.нав.} = 1423 + 512,219 = 1935 \text{ (Н} \cdot \text{м)}; \quad (2.26)$$

- гальмування в режимі номінального навантаження:

$$M_{с3} = M_{с.нав.} - M_{дин.нав.} = 1423 - 512,219 = 910,844 \text{ (Н} \cdot \text{м)}; \quad (2.27)$$

- пуск в режимі холостого ходу:

$$M_{C5} = M_{C.XX.} + M_{дин.XX.} = 1274 + 453,372 = 1727 (H \cdot m); \quad (2.28)$$

- гальмування в режимі холостого ходу:

$$M_{C7} = M_{C.XX.} - M_{дин.XX.} = 1274 - 453,372 = 820,454 (H \cdot m); \quad (2.29)$$

Приведемо навантажувальну діаграму до стандартного вигляду для повторно-короткочасного режиму:

$$M_{C.екв.} = \sqrt{\frac{M_{C1}^2 \cdot t_n + M_{C.нав.}^2 \cdot t_{1y} + M_{C3}^2 \cdot t_z + M_{C5}^2 \cdot t_n + M_{C.XX.}^2 \cdot t_{2y} + M_{C7}^2 \cdot t_z}{\beta_n \cdot t_n + t_{1y} + \beta_z \cdot t_z + \beta_n \cdot t_n + t_{2y} + \beta_z \cdot t_z}}, \quad (2.30)$$

де $\beta_n (\beta_z)$ – коефіцієнт погіршення тепловіддачі при пуску (гальмуванні).

$$\beta_i = \beta_a = \frac{1 + \beta_0}{2} = \frac{1 + 0,5}{2} = 0,75, \quad (2.31)$$

де β_0 – коефіцієнт погіршення тепловіддачі при нерухомому роторі (для двигунів із самовентиляцією $\beta_0 = 0,5$).

Після підстановки розрахованих значень у вираз $M_{C.âââ.}$ отримаємо:

$$M_{C.екв.} = 1381 (H \cdot m).$$

Розрахункова потужність приводного двигуна:

$$P_{роз.} = \frac{M_{C.екв.} \cdot \omega_{дов.} \cdot \sqrt{\frac{TB\%}{TB_{см} \%}}}{z_k}, \quad (2.32)$$

де z_k – кількість точок приведення ($z_k = 2$);

$TB_{см.}$ – стандартне значення тривалості включення ($TB_{см.} = 40\%$).

$$P_{роз.} = \frac{1384 \cdot 73,29 \cdot \sqrt{\frac{25}{40}}}{2} = 35,020 \text{ (кВт)}.$$

Висновок: У підсумку проведеного етапу було здійснено попередній розрахунок необхідної потужності електродвигуна з урахуванням усіх передбачуваних технологічних режимів функціонування та навантажень на електровоз. Наступним етапом дослідження є техніко-економічне обґрунтування вибору найбільш доцільної системи електропривода, а також визначення оптимального типу привідного електродвигуна.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Технічне обґрунтування вибору системи електропривода

Перше, що необхідно зробити для оптимального вибору системи електроприводу – це об'єктивно оцінити варіанти, які пропонуються на ринку регульованих приводів та технічно відповідають вимогам прикладного процесу. Головними критеріями цієї оцінки повинні бути:

1. Загальна вартість закупівлі регульованого приводу і необхідного додаткового устаткування.
2. Поточні експлуатаційні витрати:
 - обслуговування;
 - виробничі витрати, ККД, і т.д;
 - необхідна площа розміщення.
3. Технологічні і інноваційні аспекти:
 - динамічний відгук, час розгону; 4-х квадрантні операції; аварійний стоп, і так далі;
 - масо-габаритні характеристики.
4. Експлуатаційна надійність, придатність приводів:
 - відповідність міжнародним вимогам і стандартам ІЕС, ГОСТ Р, EN, CE-EMC; CSA, UL, і т.д.;
 - умови навколишнього середовища; ступінь захисту корпусу; ремонт "по-місцю".
5. Вплив на зовнішнє середовище:
6. Необхідний простір для перетворювача та двигуна.
7. Відведення тепла.

Із збільшенням розмірів перевезень і потужності електровозів значно зростають тягові струми, а отже, втрати напруги і електроенергії в контактній мережі. У зв'язку з цим на найбільш вантажонапружених ділянках залізниць,

електрифікованих на постійному струмі напругою 3000 В, виникають обмеження в русі поїздів. Щоб уникнути цього, доводиться збільшувати площу перетину контактної підвіски, число підстанцій, що пов'язане з великими грошовими витратами, а головне — із збільшенням споживання дефіцитних матеріалів, наприклад міді.

Двигуни, які можуть бути використані як тягові на електровозі, повинні задовольняти як мінімум двом вимогам. Перш за все вони повинні допускати можливість регулювання в широких межах частоти обертання. Це дозволяє змінювати швидкість руху поїзда. Крім того, необхідно мати можливість регулювати в широкому діапазоні силу тяги, тобто момент, що обертає, розвивається двигуном. Так, двигуни електровоза повинні забезпечувати значну силу тяги під час зрушення поїзда, його розгону, при подоланні крутих підйомів і тому подібне і знижувати її за легших умов руху.

Якщо врахувати великі моменти інерції локомотивів, то питання застосування економічного електроприводу, що забезпечує рекуперацію енергії в мережу при гальмуванні, тут займає важливе місце.

Для регульованого електроприводу електровоза, на відміну від традиційно існуючих систем електроприводу постійного струму, може бути застосований і електропривод змінного струму по системі ПЧ-АД або електропривод з вентильним двигуном. За техніко-економічними показниками і експлуатаційними характеристиками приводи цих типів мають більшу перевагу на відміну від електроприводів постійного струму.

На сьогоднішній день застосування частотного регулювання швидкості обертання електродвигунів змінного струму стає промисловим стандартом. Це обумовлено досягненням в сфері розробки і виготовлення сучасних перетворювачів частоти, застосування яких полягає в реалізації найбільш економічних алгоритмів управління двигуном для кожного конкретного технологічного процесу. Застосування частотно-регульованих електроприводів дозволяє зекономити від 20 до 50% електроенергії у

порівнянні з іншими електроприводами, не оснащеними перетворювачами частоти.

3.2 Економічне обґрунтування вибору системи електропривода

Для порівняння техніко-економічних показників систем електроприводу розглядатимемо такі системи:

- тиристорний перетворювач із двигуном постійного струму (ТП-ДПС);
- широтно-імпульсний перетворювач з двигуном постійного струму (ШП-ДПС);
- перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АД).

Розглянемо ці варіанти з економічної точки зору. Використовуємо метод зведених витрат:

$$Z = E_n \cdot K + C, \quad (3.1)$$

де E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ($E_n=0,15$);

K – капіталовкладення, в які входять вартість двигуна D та системи керування СК;

C – собівартість.

$$C = C_a + C_0 + C_{\Delta W}, \quad (3.2)$$

де C_0 – витрати на обслуговування і ремонт.

$$C_0 = E_0 \cdot K, \quad (3.3)$$

де C_a – амортизаційні відрахування.

$$C_a = E_a \cdot K, \quad (3.4)$$

де E_a – коефіцієнт ($E_a = 0,05$);

$C_{\Delta W}$ – витрати на електроенергію ($E_o = 0,015$).

$$C_{\Delta W} = m_0 \cdot \Delta W, \quad (3.5)$$

де m_0 – вартість електроенергії;

ΔW – кількість втраченої електроенергії за рік.

$$\Delta W = \Delta P \cdot T_p, \quad (3.6)$$

де T_p – річний час роботи механізму за рік.

Час роботи механізму за рік:

$$T_p = d \cdot z \cdot t, \quad (3.7)$$

де d – кількість робочих днів ($d = 225$);

z – кількість змін ($z = 1$);

t – кількість робочих годин в день ($t = 8$).

$$T_p = 225 \cdot 1 \cdot 8 = 1800 \text{ (год)}.$$

Згідно з Умовами та Правилами здійснення підприємницької діяльності з постачання електричної енергії за регульованим тарифом, затвердженими постановою НКРЕ від 13.06.1996 року №15/1 та постановою НКРЕКП від 24.04.2017 року № 538 вартість електроенергії для електрифікованого залізничного транспорту із ПДВ вираховується: (вартість електроенергії – 6,85грн/(кВт·год) без ПДВ, вартість розподілу – 2,26 грн/(кВт·год) без ПДВ, $c = 1,2 \cdot (6,85 + 2,26) = 10,93$ грн/(кВт·год) з ПДВ).

Втрати потужності:

$$\Delta P = k_3 \cdot P_n \cdot (1 - \eta_d) / \eta_d, \quad (3.8)$$

де k_3 – коефіцієнт завантаження ($k_3 = 0,7$).

η_d – ККД двигуна ($\eta_d = 0,9$).

Термін окупності:

$$T = K / Z. \quad (3.9)$$

Покажемо приклад розрахунку для системи ПЧ-АД. Результати розрахунків зводимо в таблиці 3.1.

При вартості двигуна $D = 48520$ грн. та системи керування $СК = 31440$ грн. капіталовкладення становитимуть:

$$K = D + СК, \quad (3.10)$$

$$K = 48520 + 31440 = 79960 \text{ (грн.)}.$$

Таблиця 3.1 – Економічне порівняння варіантів систем електропривода

Показники	Тип системи електроприводу			
	ТП-ДПС	ШП-ДПС	РКС-ДПС	ПЧ-АД
Розрахована P_n двигуна, кВт	35			
Вартість двигуна (Д), грн.	0	0	0	48520
Вартість системи керування (СК), грн.	46860	43686	56200	31440
Капіталовкладення $K=D+СК$, грн	46860	43686	56200	79960
Амортизаційні відрахування, $Ca = Ea \cdot K$, грн.	2343	2184	2810	3998
E_o	0,015			
Витрати на обслуговування і ремонт, $Co = E_o \cdot K$, грн.	703	655	843	1199
Витрати на електроенергію, грн	62300	61420	64820	53513
Собівартість $C = Ca + Co + C_{\square w}$, грн.	65345,9	64259,6	68473,0	58710,7
Зведені витрати $Z = E_n \cdot K + C$, грн.	72374,9	70812,5	76903,0	70704,7

Амортизаційні витрати відповідно:

$$C_a = 0,05 \cdot 79960 = 3998 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на обслуговування і ремонт:

$$C_o = 0,015 \cdot 79960 = 1199 \text{ (грн.)}.$$

Витрати потужності відповідно до (3.8):

$$\Delta P = 0,7 \cdot 35 \cdot (1 - 0,9) / 0,9 = 2,72 \text{ (кВт)}.$$

Кількість втраченої електроенергії за рік відповідно до (3.6):

$$\Delta W = 2,72 \cdot 1800 = 4896 \text{ (кВт·год)}.$$

Витрати на електроенергію відповідно до (3.5):

$$C_{\Delta W} = 10,93 \cdot 4896 = 53513 \text{ (грн.)}.$$

Собівартість із врахуванням обслуговування та витрат електроенергії відповідно до (3.2):

$$C = 3998 + 1199 + 53513 = 58710,7 \text{ (грн.)}.$$

Зведені витрати відповідно до (3.1):

$$Z = 0,15 \cdot 79960 + 58710,7 = 70704,7 \text{ (грн.)}.$$

Аналогічним чином розраховуються економічні показники і для інших систем із врахуванням особливостей їх функціонування та чергування режимів роботи.

Висновок: Аналізуючи показники таблиці 3.1, можна зробити висновок, що найбільш вигідними з точки зору економічних показників є система змінного струму, оскільки навіть із врахуванням необхідності виконання заміни тягових електричних двигунів вона знаходиться приблизно на одному рівні по величині зведених витрат з системами ТП-Д та ШП-Д.

Оскільки в нашому випадку важливим критерієм у виборі системи електроприводу є рівень спожитої електроенергії, тому вибираємо систему ПЧ-АД. Використання плавного частотного пуску забезпечить:

- обмеження пускових струмів двигуна, виключення великих коливань по формі механічних моментів при прямому пуску електродвигуна від мережі, що підвищує довговічність двигуна і механічної частини;
- зниження теплових ударних навантажень при прямому пуску;

- виключення підвищених електродинамічних зусиль в обмотках двигуна, що призводить до механічного руйнування ізоляції обмоток;
- виключення великих пускових струмів в мережах, що особливо важливо для районів з недостатньою потужністю електроенергетичних систем на шляху проходження газопроводів.

Враховавши результати техніко-економічного порівняння та відповідність вимогам, що висуваються до системи ЕП, вибираємо систему керування ПЧ-АД.

4 МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА

4.1 Вибір тягового електродвигуна

У сучасній промисловості найширше застосування мають два основні типи електродвигунів: трифазні асинхронні машини змінного струму та колекторні двигуни постійного струму з різними схемами збудження.

З урахуванням заданої швидкості обертання та попередньо розрахованої необхідної потужності, а також економічної доцільності, приймається рішення на користь використання двигунів змінного струму. Для електропривода контактного шахтного електровоза моделі 7КА передбачається застосування двомоторної системи, тобто тягова потужність повинна забезпечуватися парою двигунів, що працюють паралельно.

В якості таких силових агрегатів обрані електродвигуни змінного струму типу ДТРН-23,5АС, технічні характеристики яких подано у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Паспортні дані двигунів

Найменування параметрів ДТРН-34/25АС	Норми	
	Режим роботи по ГОСТ 183	
	S2-60 хв (годинний)	S1 (тривалий)
Номінальна потужність, кВт	23,5	9,4
Номінальна напруга, В	185	185
Номінальний струм, А	152	61
Номінальна частота обертання, об/хв	900	1410
Максимальна частота обертання, об/хв.	2500	
Напрямок обертання	реверсивне	
Виконання	рудничне	
Рівень ізоляції по ГОСТ 24719	I	
Степінь захисту по ГОСТ 14254	IP54	
Спосіб охолодження по ГОСТ 20459	IC01	
Маса, кг	500	

Асинхронні тягові електродвигуни застосовуються у шахтних електровозах змінного струму з частотно-регульованою системою керування.

Зовнішній вигляд тягового двигуна моделі ДТРН-23,5АС наведено на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Тяговий двигун для контактного електровоза
типу ДТРН-23,5АС

Особливі конструктивні риси обраного електродвигуна включають:

- Корпус, виготовлений із шарів електротехнічної сталі, що одночасно виконує функцію статора.
- Ротор із короткозамкненою мідною кліткою, забезпечує надійну роботу при різних режимах.
- Встановлені датчики для контролю швидкості обертання та температури двигуна.
- Застосування сучасних ізоляційних матеріалів та мастильних речовин, що гарантують високу електричну міцність та теплову стабільність агрегату.
- Підшипники провідного виробника FAG, які забезпечують довговічність і надійність механічної частини.

4.2 Переваги електротяги змінного струму

Двигун постійного струму послідовного збудження зарекомендував себе як надійний тяговий привод завдяки своїм ключовим характеристикам: високій перевантажувальній здатності, м'якій механічній характеристиці, що спрощує налаштування багатодвигунних систем з індивідуальним розподілом навантажень на ведучі осі.

Водночас, він має суттєві недоліки: складність підтримки стабільної швидкості на різних режимах руху, низька енергоефективність через часте застосування релейно-реостатного управління, а також значні втрати потужності на активних елементах. Конструктивна складність приводу і підвищені вимоги до технічного обслуговування ускладнюють експлуатацію й модернізацію цього типу двигуна.

Зазвичай двигуни постійного струму комплектуються реостатними системами управління з силовими контролерами — технологією, що хоча й морально застаріла, все ще поширена на гірничорудних підприємствах завдяки простоті та ремонтпридатності. Проте такі системи супроводжуються значними енергетичними втратами і знижують жорсткість механічної характеристики, що ускладнює керування електровозом.

Актуальність переходу до електротяги змінного струму підтверджується численними дослідженнями, які фокусуються на застосуванні асинхронних приводів у шахтних електровозах. Технічний та експлуатаційний знос підземного транспорту вимагає впровадження сучасних технологій та модернізації обладнання.

Переваги електроприводу змінного струму для шахтних електровозів є вагомими. По-перше, на змінному струмі можливо передавати значно більшу потужність у порівнянні з постійним струмом. Це особливо важливо для потужних тягових приводів, які використовуються в підземних умовах.

По-друге, змінний струм забезпечує більш ефективне гасіння електричної дуги, що виникає при проходженні через секційні ізолятори та

при перемиканні роз'єднувачів. Завдяки періодичному переходу струму через нульове значення фази, дуга природно припиняється, що значно підвищує надійність та безпеку експлуатації. На відміну від цього, у колах постійного струму наявність реактивних опорів лише ускладнює процес гасіння дуги, що створює додаткові технічні труднощі.

Крім того, конструкція тягових підстанцій для систем змінного струму є простішою та надійнішою. Використання одного потужного стаціонарного випрямляча дозволяє ефективніше і стабільніше жити електровози, на відміну від систем із численними менш потужними випрямлячами, розміщеними безпосередньо на кожному електровозі. Це сприяє зниженню витрат на обслуговування та підвищенню загальної надійності електроприводу.

Особливу небезпеку становить контактна мережа в зонах навантаження руди — зокрема, в ортах та заїздах. У цих виробках контактний провід часто прокладають відводом убік або розривають безпосередньо у пунктах навантаження. При цьому допустима висота підвіски контактного дроту становить лише 1,8 метра, що створює реальну загрозу дотику головою машиніста до дроту — ситуація, яка є вкрай небезпечною.

Для проходження через такі ділянки машиніст змушений виконувати складні маневри зі струмознімачем, що підвищує ризик нещасних випадків і ускладнює безпечну експлуатацію електровоза.

4.3 Аналіз режимів роботи прототипу системи керування з використанням асинхронної тяги

В Україні створено і успішно пройшов етап попередніх випробувань на шахтах Криворізького басейну перший вітчизняний зразок шахтного електровоза, оснащеного сучасним тяговим електроприводом. Система електроприводу базується на IGBT інверторах і тягових асинхронних

замикаючий діод, зворотний діод і обмежувач перенапруг, що забезпечують стабільність і надійність живлення системи.

Обмежувач перенапруг призначений для запобігання появі небезпечних перенапруг на конденсаторах, зокрема тих, що виникають при резонансному заряді. Це дає змогу уникнути застосування схеми попереднього заряду через резистор, що економить робочий час і підвищує надійність системи.

Під час руху головними виробками електровоз працює у контактному режимі, отримуючи живлення від контактного проводу (КП) через струмознімач (ХА). Далі напруга проходить через автоматичний вимикач QF1 і подається на вхідний фільтр, який обслуговує систему керування електроприводом та зарядний пристрій.

Регулювання швидкості обертання тягових двигунів здійснюється автономними інверторами напруги I1 та I2, побудованими на силових IGBT-транзисторах. Діапазон регулювання частоти на виході інверторів становить від 2 до 100 Гц. При цьому задається напруга на двигунах, а частота автоматично підлаштовується відповідно до заданої напруги та сили тяги електровоза, забезпечуючи оптимальний режим роботи електроприводу.

Слід зауважити, що технічні характеристики типових електровозів не завжди враховують особливості експлуатації у рудних шахтах. Зокрема, коефіцієнт тяги стандартних моделей становить близько 0,17, тоді як у реальних умовах рудних шахт він коливається в межах 0,21–0,25, що зумовлено специфікою рейкового полотна та умовами зчеплення.

Для підвищення безпеки та ефективності передбачено електричне гальмування тягових двигунів. При гальмуванні контактор KM1 відключається, а енергія, що виробляється двигунами M1 і M2, через інвертори передається на гальмівний резистор. Інтенсивність гальмування регулюється за допомогою гальмівного чоппера на транзисторі, що дозволяє плавно керувати гальмівним моментом.

У разі відсутності живлення від контактної мережі електровоз переходить на живлення від допоміжної акумуляторної батареї АБ. Розрахунки показують, що ємність батареї має становити 350–400 А·год при номінальній напрузі 80 В, що відповідає параметрам комплектних акумуляторних батарей, які використовуються в електронавантажувачах.

Під час роботи електровоза в основних виробках під контактною мережею відбувається автоматична підзарядка акумуляторної батареї за допомогою зарядного пристрою (ЗУ). Зарядний пристрій реалізує імпульсне регулювання струму заряду в залежності від напруги на акумуляторах, що забезпечує ефективний та безпечний процес заряджання.

Для запобігання надмірного виділення газів під час заряджання напруга на одному акумуляторному елементі не повинна перевищувати 2,4 В, що для батареї з 40 елементів відповідає максимальній напрузі 96 В.

Необхідний струм підзарядки акумуляторної батареї визначається співвідношенням часу роботи електровоза під контактною мережею і без неї. При цьому чим більша довжина квершлагів і штреків, тим менший необхідний струм заряду. За розрахунками, оптимальний струм підзарядки знаходиться в межах 50–100 А, а струм, споживаний електровозом з контактної мережі під час зарядки, становить приблизно 20–35 А.

4.4 Розробка математичної моделі та схеми електричної структурної системи електропривода шахтного електровоза

Однією з ключових характеристик шахтного електровоза є його тягово-швидкісна характеристика, яка описує залежність швидкості руху від прикладеного тягового зусилля.

Асинхронний двигун володіє жорсткою природною механічною характеристикою, що є перевагою для тягового приводу з точки зору забезпечення необхідного тягового зусилля [3]. Тягову характеристику локомотива можна визначити, спираючись безпосередньо на цю природну

характеристику, якщо вона розташована у межах допустимого діапазону тягових характеристик.

Розглянемо реалізацію тягової характеристики з використанням асинхронного приводу, зокрема: 1) оптимальна розробка силової схеми електровоза; 2) створення системи керування.

Важливою проблемою при проектуванні перетворювальної установки є вибір між застосуванням окремих перетворювачів для кожного двигуна або одного спільного пристрою. Особливість асинхронного приводу полягає в тому, що при паралельному підключенні двигунів до одного джерела живлення та наявності різниці в характеристиках приводів (наприклад, через різний ступінь зношення ведучих коліс) навантаження розподіляється нерівномірно, що може призвести до неприпустимо великих відхилень. Тому необхідно або живити тягові двигуни через індивідуальні перетворювачі, або при використанні спільного перетворювача впроваджувати спеціальні заходи для балансування навантажень між двигунами.

Як відомо, при регулюванні частоти асинхронний двигун може забезпечувати набір механічних характеристик, які розміщуються як вище, так і нижче за його природну характеристику. Проте номінальний крутний момент можливо досягти лише при напрузі живлення з частотою, меншою за номінальну, оскільки при перевищенні номінальної частоти регулювання здійснюється в режимі постійної потужності.

Найбільш ефективним вважається використання окремих інверторів для кожного двигуна. Такий підхід дає перевагу в тому, що втрати енергії розподіляються між двома перетворювачами, що полегшує їхню систему охолодження. У зв'язку з цим, спрощена структурна схема силової частини асинхронного тягового приводу представлена на рисунку 5.2. На схемі зображено два незалежних інвертори U_2 і U_3 , перетворювач постійної напруги U_1 та мережу живлення.

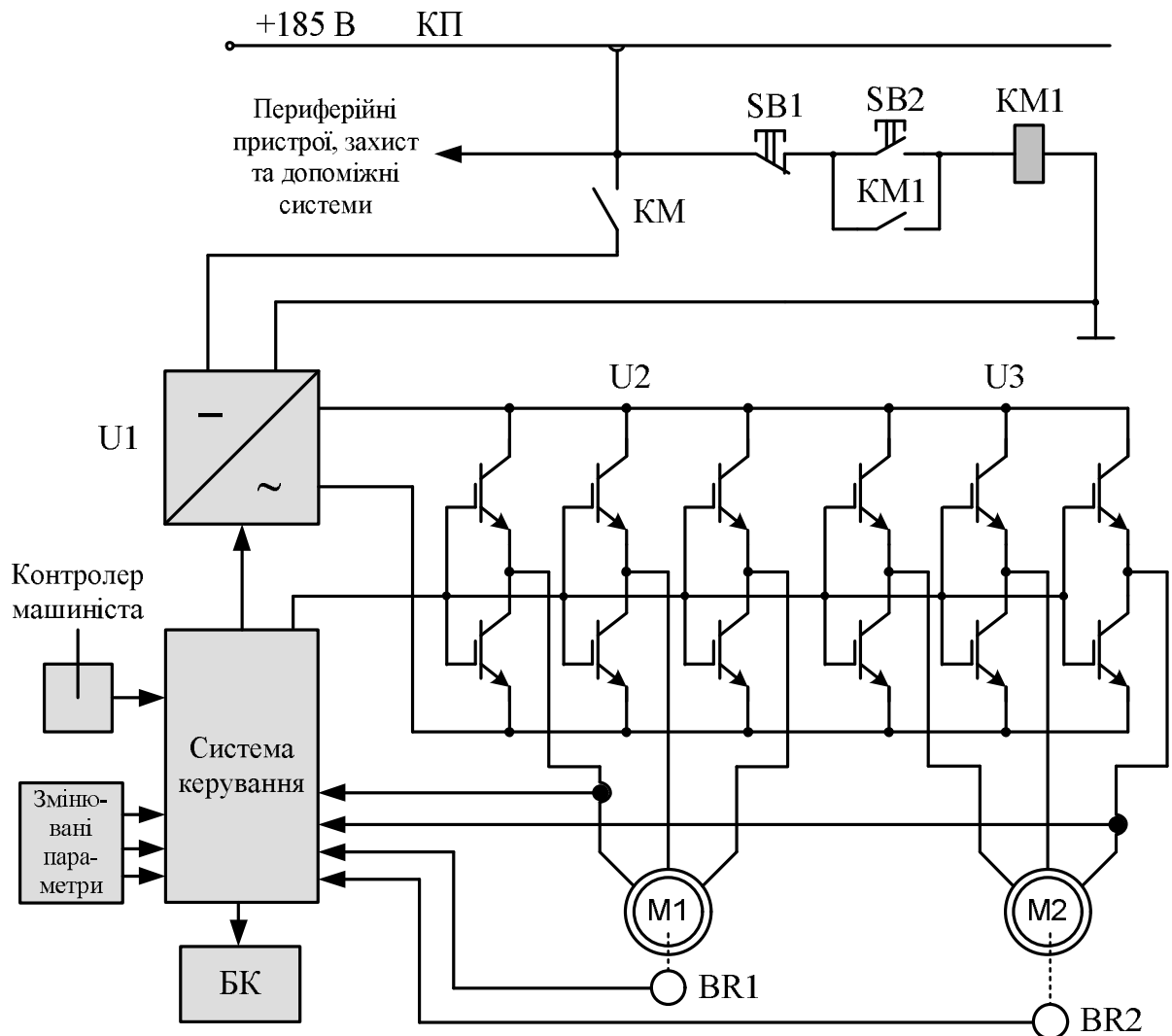


Рисунок 4.3 – Структурна схема силової частини асинхронного тягового привода шахтного електровоза

Оскільки для тягової характеристики важливо забезпечити високу жорсткість, а діапазон існування цих характеристик в основному обмежується умовами гальмування, система керування частотою обертання може бути значно спрощена. Вхідним сигналом такої системи є команда на встановлення бажаної швидкості руху, яка переважно безпосередньо подається на вхід управління частотою обертання двигунів. Основне завдання системи керування полягає у накладенні обмежень на вихідну частоту інверторів залежно від поточного навантаження приводу.

До таких обмежень належать: 1) обмеження максимальної швидкості відповідно до тягової характеристики; 2) обмеження частоти інвертора залежно від стану мережі живлення; 3) обмеження частоти з метою підтримання роботи двигуна в межах стійкої ділянки механічної характеристики (до критичного ковзання).

Оптимальним є побудова подібної системи на базі мікропроцесорної техніки, яка досить просто дозволяє реалізувати функції порівняння дискретних величин. Система керування отримує сигнали завдання від контролера машиніста, а також від пристроїв, що задають змінні параметри, наприклад, максимальну швидкість руху при певних умовах відкатки. Вхідними сигналами для системи є дані про кутову швидкість кожного двигуна, а також параметри роботи перетворювачів — струми і напруги, які відповідають силовим колам. На виході система формує команди керування для перетворювачів.

Розглянемо силовий канал електроприводу:

- електродвигун, що виконує функцію електромеханічного перетворювача;
- перетворювач частоти, що відповідає за функцію електричного перетворювача;
- механічна система, що виконує функцію механічного перетворювача [7].

Рухомий склад являє собою електромеханічну систему, поведінка якої може бути апроксимована за допомогою системи лінійних диференціальних та алгебраїчних рівнянь. Ці рівняння поділяються на дві підсистеми: перша описує електромеханічний блок, що включає тягові електроприводи двох колісних пар шахтного електровоза, друга — механічну частину електровоза разом із рухомим складом. При цьому необхідно враховувати взаємодію між цими підсистемами, вплив сил на зчіпний пристрій електровоза, а також процеси прямого і зворотного перетворення енергії в електромеханічному

перетворювачі приводу при моделюванні. Крім того, в моделі механічної частини слід брати до уваги ефект буксування коліс, який є важливою характеристикою роботи рухомого складу.

Електрична частина електровоза складається з двох перетворювачів частоти з векторним керуванням та двох асинхронних тягових двигунів, що незалежно обертають першу і другу колісні пари (КП).

Механічна частина моделі представлена як багатомасова система, що включає маси першої та другої колісних пар, а також маси електровоза і вагонеток. Ці маси взаємодіють через пружні зв'язки в конструкції рухомого складу, а також враховується режим буксування колісних пар відносно рейок.

Рівняння, які описують динаміку змінних математичної моделі кожного двигуна, формуються у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} i_{s_x} = (U_{s_x} + L'_s \omega_{\kappa} i_{s_y} + \frac{k_R}{T_R} \Psi_{R_x}) \frac{1}{R(1+T'_s p)}; \\ i_{s_y} = (U_{s_y} - L'_s \omega_{\kappa} i_{s_x} - p_{\pi} \omega_{\kappa} \Psi_{R_x}) \frac{1}{R(1+T'_s p)}; \\ \Psi_{R_x} = \frac{T_s}{(1+T_R p)} k_R i_{s_x}; \\ M = \frac{3}{2} p_{\pi} k_R \Psi_{R_x} i_{s_y}; \\ \omega_{\kappa} = p_{\pi} \omega + k_R \frac{i_{s_y}}{\Psi_{R_x}}, \end{cases}$$

де U_{sx}, U_{sy} – складові напруги джерела струму по осям x та y ;

i_{sx}, i_{sy} – складові струму статора по осі x та y ;

ω_{κ} – частота обертання рухомої системи координат xx та yy ;

ω – частота обертання ротора;

p_{π} – число пар полюсів;

T_R, T_S – постійні часу статора і ротора;

L'_S – індуктивність статора.

Структурна схема силового тракту частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним керуванням будується на основі моделі асинхронного двигуна в обертовій системі координат d, q, орієнтованій за напрямком результуючого вектора потокозчеплення ротора. Загальна схема такого підходу наведена на рисунку 5.3.

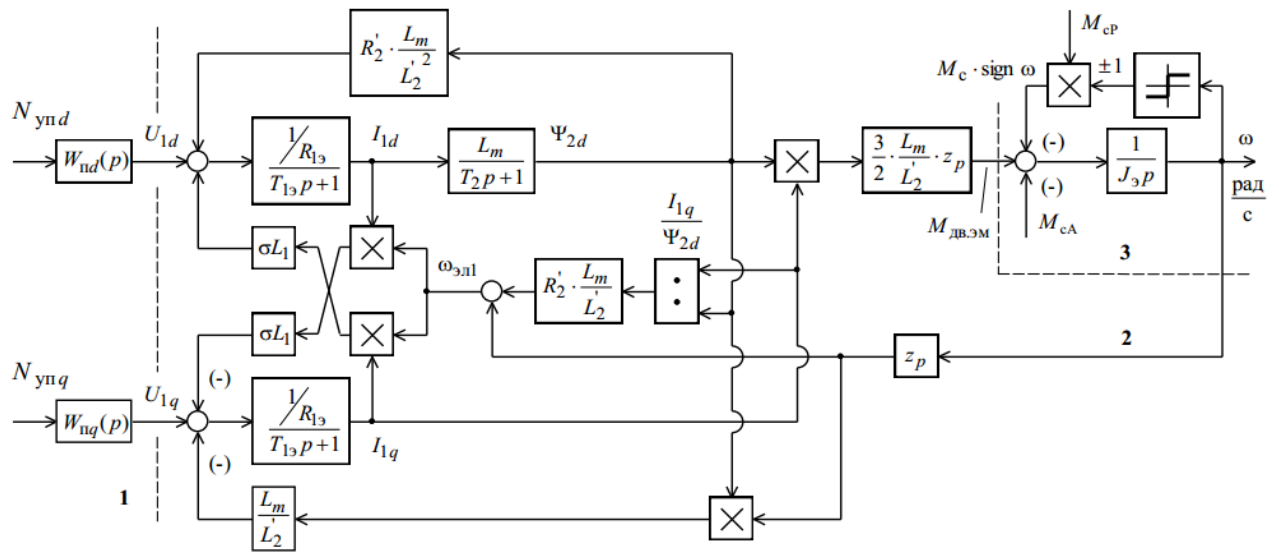


Рисунок 4.4 – Структурна схема силового каналу асинхронного електропривода із векторним керуванням

На рисунку 4.4 показані наступні елементи: 1 – перетворювач, що формує фазні напруги для управління асинхронним двигуном; 2 – асинхронний електродвигун, змодельований у системі координат d, q, орієнтованій за напрямком результуючого вектора потокозчеплення ротора; 3 – одномасова механічна система, яка в загальному випадку враховує навантаження як активного, так і реактивного типу.

4.5 Розробка схеми електричної принципової системи електропривода шахтного електровоза

На сучасних вітчизняних електровозах використовуються електроприводи з тяговими двигунами постійного струму та контактно-резисторною системою управління [5, 6]. Такий тип електроприводу в електричній тязі вважається застарілим, що суттєво впливає на низьку ефективність роботи всього комплексу:

- енергетичні втрати в реостатах становлять приблизно 30–40 % від загального споживання;
- низька надійність тягових двигунів, строк служби яких не перевищує 2–4 місяців;
- значні матеріальні та трудові витрати на ремонт і технічне обслуговування двигунів постійного струму;
- недостатня надійність контролерів системи керування;
- високий ризик виникнення пожежі через силові контролери в кабіні машиніста, оскільки їхні кришки часто пропалюються електричною дугою;
- ступінчасте регулювання, яке не дає змоги повністю реалізувати тягові можливості електровоза;
- існуюча система приводу обмежує можливості впровадження автоматизованих засобів керування роботою електровоза.

Крім того, зниження трудовитрат на електровозному транспорті може бути досягнуто завдяки впровадженню дистанційного керування електровозами у місцях навантаження та розвантаження руди. При цьому машиніст виконує дві ролі – контролює процес завантаження чи розвантаження вагонеток і керує електровозом. Команди управління можуть передаватися за допомогою індуктивного або радіоканалу [3].

Тому пропонується комплекс модернізації залізничних шахт повинен виглядати наступним чином:

1. створення досконалої тягової одиниці – електровоза з тяговим електромеханічним комплексом, що відповідає сучасним вимогам і збільшенням зчіпної ваги до 16 - 18 т;
2. «конструювання» лінійки автоматизації рухом засобів рухомого складу;
3. створення локальних систем автоматизації управління електровозами при вантажно-розвантажувальних операціях;
4. створення підсистем управління рухом по головним відкатувальним виробкам.

Як впливає з наведеного вище, ключовим і основоположним принципом модернізації є розробка нових видів (типів) електровозів на основі сучасних тягових електротехнічних систем.

Підсумовуючи проведений аналіз та вибір компонентів, які інтегруються в систему керування електроприводу електровоза моделі 7КА, представимо принципову електричну схему електровоза (рисунок 4.5).

Головними елементами тягового електроприводу контактного електровоза є: пульт керування, система управління з інверторами I1, I2 та гальмівним чопером VT, блок живлення для керуючих кіл і освітлення (БП), зарядний пристрій ЗУ, акумуляторна батарея АБ, а також тягові асинхронні двигуни M1 і M2.

Вхідний фільтр реалізований окремим блоком, що включає індуктивність L та конденсатори. До його складу також входять запираючий діод, зворотний діод і обмежувач перенапруг.

Обмежувач перенапруг призначений для запобігання виникненню небезпечних перенапруг на конденсаторах, зокрема при їх резонансному заряді. Завдяки цьому відпадає потреба в схемі попереднього заряджання конденсаторів через резистор, що знижує втрати робочого часу під час заряджання.

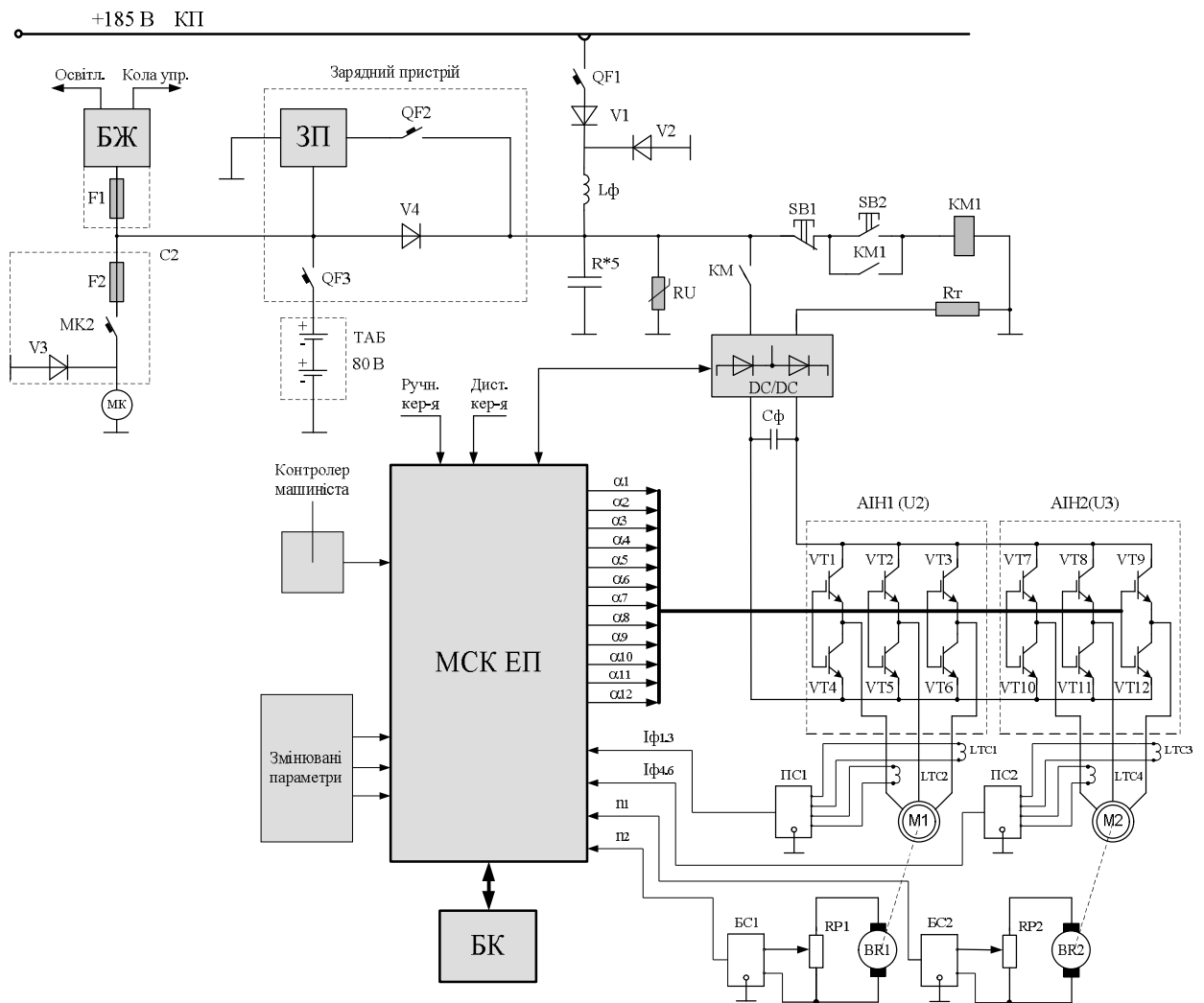


Рисунок 4.5 – Схема електрична принципова системи керування шахтного контактного електровоза типу 7КА

Під час руху по головних виробках електровоз працює в контактному режимі, отримуючи живлення від контактної провладу (КП) через струмознімач ХА. Потім напруга проходить через автоматичний вимикач QF1 і надходить на вхідний фільтр, який обслуговує як систему керування електроприводом, так і зарядний пристрій.

Регулювання швидкості обертання двигунів здійснюється автономними інверторами напруги І1 та І2, виконаними на базі силових IGBT-транзисторів. Частотний діапазон регулювання вихідної напруги інверторів становить від 2 до 100 Гц. Під час регулювання встановлюється напруга на тягових двигунах, а частота автоматично підлаштовується відповідно до

заданої напруги та поточної тягової сили електровоза згідно з відповідними співвідношеннями.

Варто зазначити, що сила тяги і, як наслідок, продуктивність електровоза можуть бути збільшені не лише за рахунок підвищення маси електровоза, а й завдяки впровадженню плавного автоматизованого керування електроприводом.

Також передбачено електричне гальмування тягових двигунів. У цьому режимі контактор КМ1 відключається, і енергія гальмування від двигунів М1 і М2 через інвертори передається на гальмівний резистор. Інтенсивність гальмування регулюється за допомогою гальмівного чоппера на транзисторі.

Для забезпечення електробезпеки контактний провід у навантажувальних виробках вимикається. Це підвищує безпеку не лише в самих навантажувальних виробках, а й під час інших видів робіт у цих зонах — таких як кріплення виробок, монтаж обладнання, прибирання шляхів від розсипаної руди, ремонт рейкових колій тощо.

У випадку відсутності контактного проводу живлення тягового приводу та інших систем електровоза здійснюється від допоміжної акумуляторної батареї (АБ). Потрібна ємність батареї становить приблизно 350–400 А·год, а номінальна напруга — 80 В. Саме з такими характеристиками виробляються комплектні батареї для електронавантажувачів.

Під час роботи електровоза на головних виробках під контактною мережею відбувається автоматична підзарядка акумуляторної батареї через зарядний пристрій (ЗУ), який здійснює імпульсне регулювання струму заряду залежно від напруги в акумуляторах. Щоб обмежити виділення газів під час заряджання, напруга на одному елементі акумулятора не має перевищувати 2,4 В, а на батареї з 40 елементів — 96 В.

Необхідний струм підзарядки визначається співвідношенням часу роботи електровоза під контактною мережею і поза нею. Чим більша

довжина квершлагів і штреків, тим меншим є потрібний зарядний струм. За розрахунками, цей струм коливається в межах 50–100 А, при цьому струм, споживаний з контактної мережі, становитиме 20–35 А.

Живлення від акумуляторної батареї забезпечується не лише для силових кіл, а й для систем керування електровозом: мотор компресора (МК) і блок стабільного живлення (БП), який живить освітлення та елементи системи управління.

Кілька слів про використання асинхронних двигунів у електроприводі контактного електровоза. Асинхронні двигуни значно дешевші за двигуни постійного струму, що дозволяє компенсувати додаткові витрати на систему керування. Через відсутність щітково-колекторного вузла надійність асинхронних тягових двигунів вища приблизно в п'ять разів, що суттєво знижує витрати на їх обслуговування та ремонт.

Акумуляторна батарея зазвичай розташовується на даху електровоза позаду кабіни, але при проектуванні нової моделі варто передбачити її монтаж всередині корпусу.

Система керування електроприводом забезпечує плавне регулювання струму та тягового зусилля, а також захист від буксування. Завдяки цьому максимальна тяга може зрости на 10–20 %. Як наслідок, максимальна сила тяги електровоза збільшується, що дозволяє стійко перевозити не 10, а 12 вагонеток вантажопідйомністю 10 тонн.

Завдяки плавному регулюванню зменшується ймовірність і сила буксування, що сприяє зниженню зносу коліс і рейок, а також знижує витрати енергії.

Мікропроцесорна система керування легко адаптується для дистанційного управління електровозами під час навантажувальних і розвантажувальних операцій. У таких випадках доцільно застосовувати готові промислові комплекти радіоуправління.

Мікропроцесорна система керування містить вузол захисту тягового двигуна шахтного електровоза від перегрівання з використанням мікросхеми AD734. Схема використовує сенсори температури, для реалізації захисту.

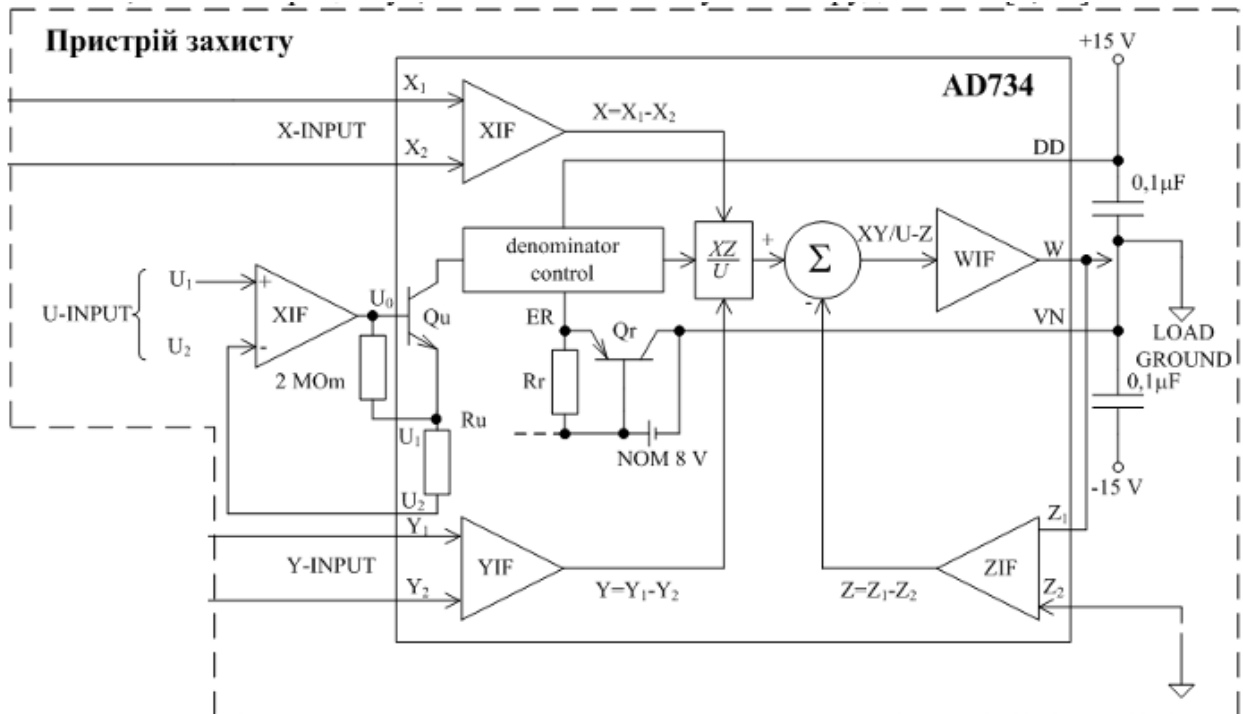


Рисунок 4.6 – Схема захисту тягового двигуна шахтного електровоза від перегрівання з використанням мікросхеми AD734

У цій схемі в якості практичного дільника може бути застосована мікросхема 4-Quadrant Multiplier/Divider AD734 від Analog Devices, Inc. Вона підтримує два режими аналогового ділення, причому рекомендується використовувати її як аналоговий дільник у режимі прямого регулювання напруги. Цей режим забезпечує підвищену точність, більшу гнучкість і дозволяє збільшити робочу частоту мікросхеми.

Ще одним важливим параметром, який потребує контролю, є швидкість руху потягу. Відомо, що вона суворо регламентується правилами безпеки у шахтах [11], які встановлюють різні обмеження залежно від ділянки підземного технологічного маршруту електровозів. Зокрема, ключовим для безпеки є обмеження швидкості електровоза відповідно до

максимально допустимої довжини гальмівного шляху: при перевезенні вантажів вона не має перевищувати 40 м, а при перевезенні персоналу – 20 м.

Висновок:

Оцінюючи переваги контактної-акумуляторних видів електровозів із запропонованим асинхронним тяговим електромеханічним комплексом порівняно з контактними контактними можна відзначити:

- за рахунок усунення контактного проводу в найбільш небезпечних місцях – вантажних виробках – суттєво підвищується безпека всіх видів робіт у вантажних виробках;

- одночасно усуваються витрати на спорудження та експлуатацію контактних мереж у навантажувальних виробках, загальна довжина яких становить близько 30 % довжини контактної мережі шахт;

- застосування частотно керованого асинхронного приводу дозволяє зменшити витрату електроенергії на транспорті на 25 - 30%;

- у порівнянні з двигунами постійного струму в 4 - 5 разів знижуються витрати на ремонт та експлуатацію асинхронних тягових двигунів.

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИЙ РЕЖИМІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА

5.1 Побудова графіків перехідних характеристик

Для трифазних асинхронних двигунів найбільш ефективним способом забезпечення плавного регулювання є зміна частоти живлячої напруги. Водночас слід зауважити, що для оптимальної роботи двигуна зміна частоти повинна супроводжуватися відповідною корекцією амплітуди напруги. Це пояснюється тим, що при фіксованій амплітуді напруги та зміні частоти змінюється магнітний потік у машині. Зниження частоти призводить до зростання магнітного потоку, що може спричинити насичення магнітопроводу, значне збільшення струму намагнічування і перегрів як сталі, так і обмоток статора. Підвищення частоти, навпаки, зменшує магнітний потік, і при сталому статичному моменті це викликає збільшення струму ротора, що може спричинити його перегрів [1].

Функціональна схема асинхронного приводу шахтного електровоза наведена на рисунку 5.1.



Рисунок 5.1 – Спрощена структурна схема асинхронного
приводу шахтного електровозу

Функціональна схема містить такі основні компоненти:

- асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, що перетворює електричну енергію живлення у механічну енергію обертання ротора;
- джерело живлення, яке перетворює постійну напругу акумуляторної батареї у трифазну змінну напругу, керовану за амплітудою та частотою;

- пристрій формування частоти обертання, що генерує сигнал для підтримки режиму роботи приводу з постійною потужністю;
- пристрій формування напруги, який створює сигнал, необхідний для забезпечення обертаючого моменту при зміні частоти обертання;
- контролер, за допомогою якого машиніст встановлює бажану швидкість руху електровоза.

Принцип роботи асинхронного приводу полягає в наступному: машиніст електровоза задає необхідну швидкість руху, яка визначається частотою обертання двигуна. Ця частота залежить від положення контролера та моменту опору обертанню (M_c) — вона обернено пропорційна цьому моменту, завдяки чому потужність, що розвиває двигун, залишається практично сталою.

Напруга, що подається на двигун, пропорційна квадратному кореню від частоти обертання під час руху, а при пуску з нерухомого положення вона відповідає номінальному значенню двигуна.

Для дослідження динамічних характеристик системи електроприводу ПЧ-АД електровоза 7КА, на основі вищезазначеного опису, була створена спрощена модель у середовищі Matlab Simulink. Схема моделі наведена на рисунку 5.2.

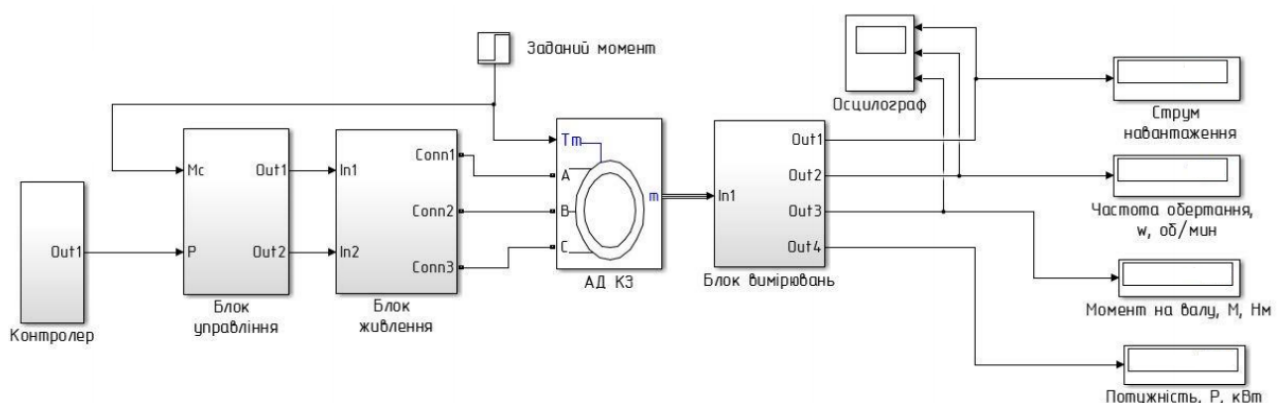


Рисунок 5.2 – Модель системи ПЧ-АД в ППП Matlab Simulink

Модель враховує перехідні процеси одного приводного асинхронного двигуна. Другий двигун моделюється аналогічно.

Структура моделі складається з наступних основних блоків:

- блок асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, параметри якого наведені на рисунку 8.3;
- блок живлення, який подає на двигун напругу керованої частоти та амплітуди;
- блок управління, що забезпечує регулювання частоти залежно від моменту, а також регулювання напруги залежно від частоти;
- блок вимірювань, який відображає контрольовані величини відповідно до одиниць, передбачених ГОСТ;
- осцилограф і дисплеї, призначені для візуалізації результатів моделювання.

Детальніше розглянемо блоки управління та живлення. Контролер (рисунк 5.3, а) виконує розрахунок значень зовнішніх характеристик привода і складається із ключів Manual Switch для вибору режимів роботи.

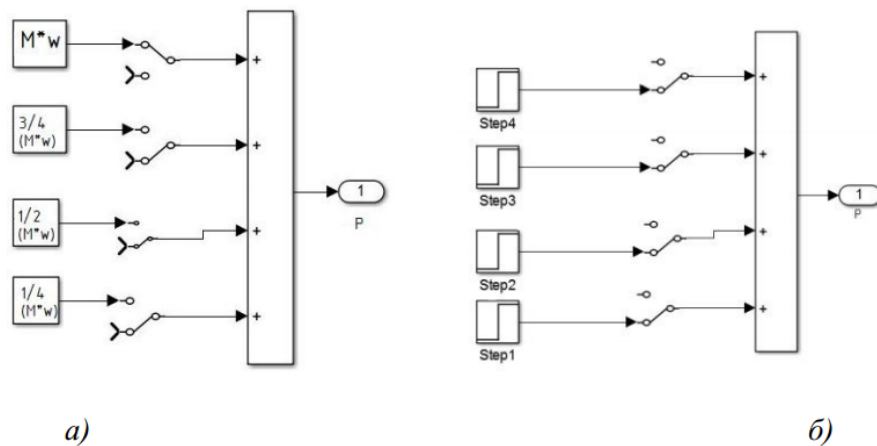


Рисунок 5.3 – Модель контролера електровоза

Кожен із ключів задає певну зовнішню характеристику приводу — залежність швидкості від моменту навантаження. Таким чином, непрямо визначається швидкість руху електровоза при заданому моменті опору.

На вході ключів подається значення потужності, яке розраховується як добуток моменту на частоту обертання двигуна.

В залежності від положення контролера змінюється потужність приводу, що дозволяє моделювати різні режими роботи та зовнішні навантаження електровоза складає $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 1 від номінальної потужності двигуна.

Контролер (рисунок 5.3, б) призначений для моделювання перехідних процесів управління двигуном електровоза на основі сигналів від контролера машиніста. Значення потужності подається на вхід з певними часовими інтервалами: спочатку — $\frac{1}{4}$ від номінальної потужності двигуна, а потім за чотири рівномірні кроки поступово збільшується до встановленого максимального значення. Таке поетапне нарощування потужності дозволяє дослідити динамічні характеристики та реакцію системи електроприводу в умовах переходу від одного режиму роботи до іншого.

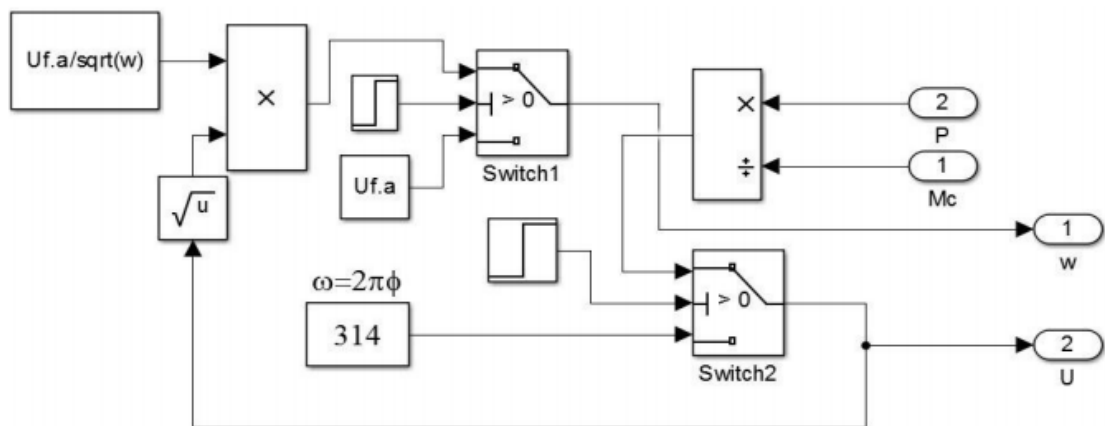


Рисунок 5.4 – Модель блоку керування

Блок керування (рисунок 5.4) призначений для формування залежності частоти обертання від моменту опору і залежності напруги від частоти.

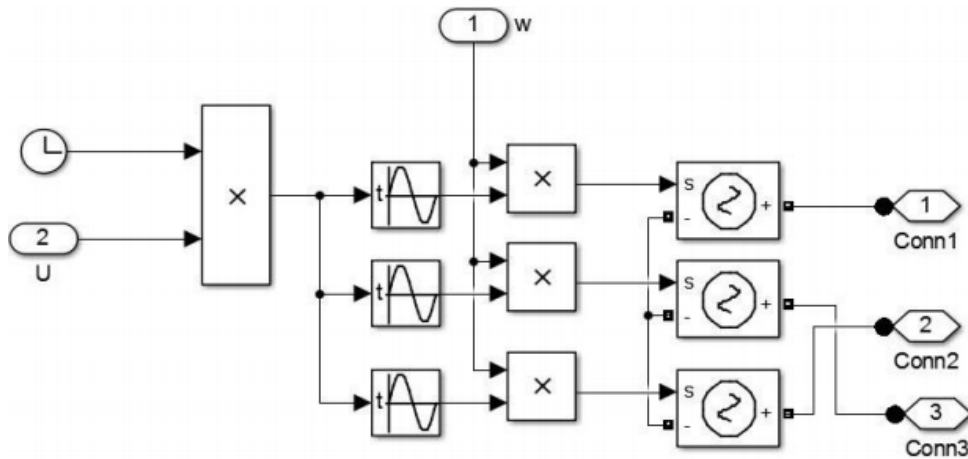


Рисунок 5.5 – Модель блоку живлення

Перша із вказаних залежностей забезпечує режим роботи двигуна з постійною потужністю, друга – змінення напруги залежно від частоти, що необхідно для асинхронного двигуна в такому режимі.

Блок живлення (рисунок 5.5) складається з трьох джерел керованої напруги (Controlled Voltage Source), по одному на кожную фазу. Керуючими елементами є генератори синусоїдальної функції (Sine Wave Function), які формують на виході джерел синусоїдальну напругу з потрібною частотою, амплітудою та фазовим зсувом на $(2\pi/3)$ радіан, з амплітудою, яка дорівнює 1. В результаті, на виході блоку живлення отримаємо трифазну напругу, яка керується за амплітудою та частотою.

Блок вимірювань виконує функції перетворення сигналів у відповідні одиниці виміру. Відображення результатів здійснюється за допомогою дисплеїв, підключених до виходу блоку.

Результати моделювання, виведені на осцилограф, наведені на рисунку 5.6.

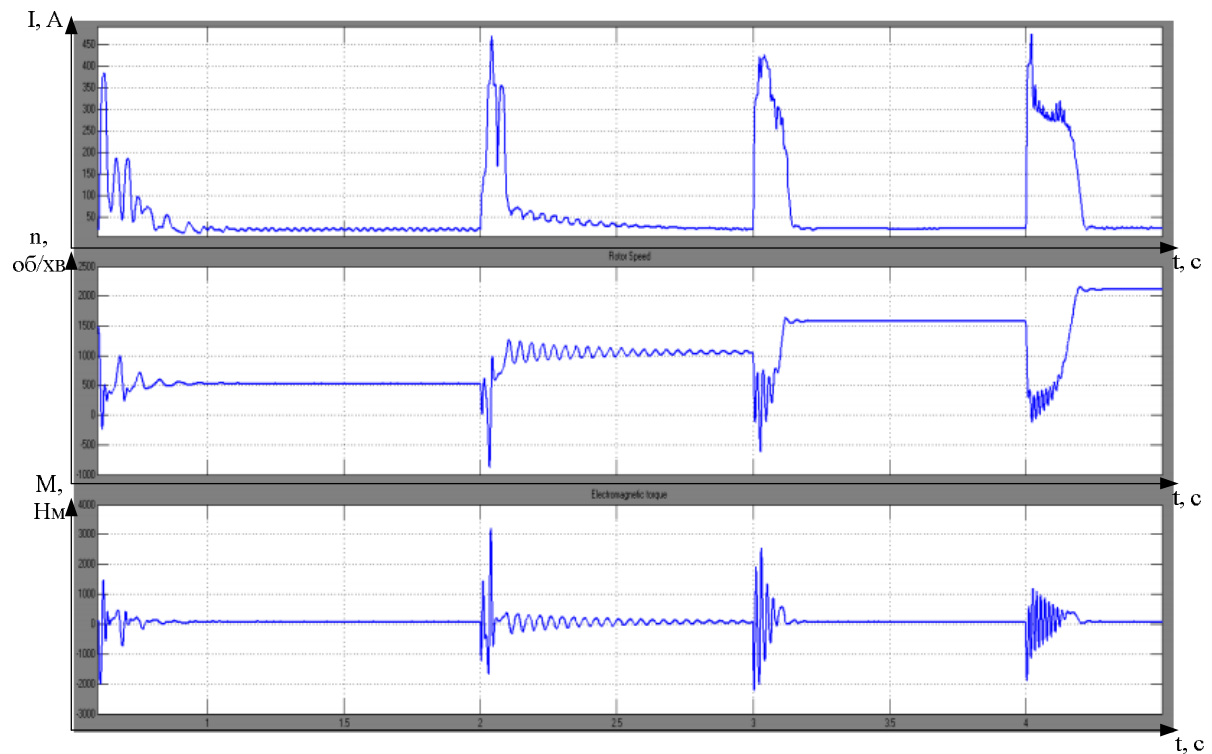


Рисунок 5.6 – Результати моделювання схеми в ППП Matlab Simulink

Під час моделювання задавалися значення моменту та положення контролера, тоді як напруга та частота обертання розраховувалися автоматично відповідно до функціональних блоків Simulink.

Запропонована схема системи керування дозволяє забезпечити економне енергоспоживання від акумуляторної батареї, точний вибір потужності двигуна та, що найважливіше, отримати механічні характеристики асинхронного двигуна.

5.2 Дослідження системи електроприводу на стійкість та якість

Щоб дослідити систему на стійкість скористаємося можливостями ППП Matlab.

Використовуючи команди $[a,b,c,d]=\text{linmod}('untitled')$, $\text{sys}=\text{ss}(a,b,c,d)$, $\text{systf}=\text{tf}(\text{sys})$, $\text{margin}(\text{sys})$ отримали ЛАЧХ і ЛФЧХ по збурювальній дії.

Графіки побудованих логарифмічних характеристик приведені на рисунку 5.7.

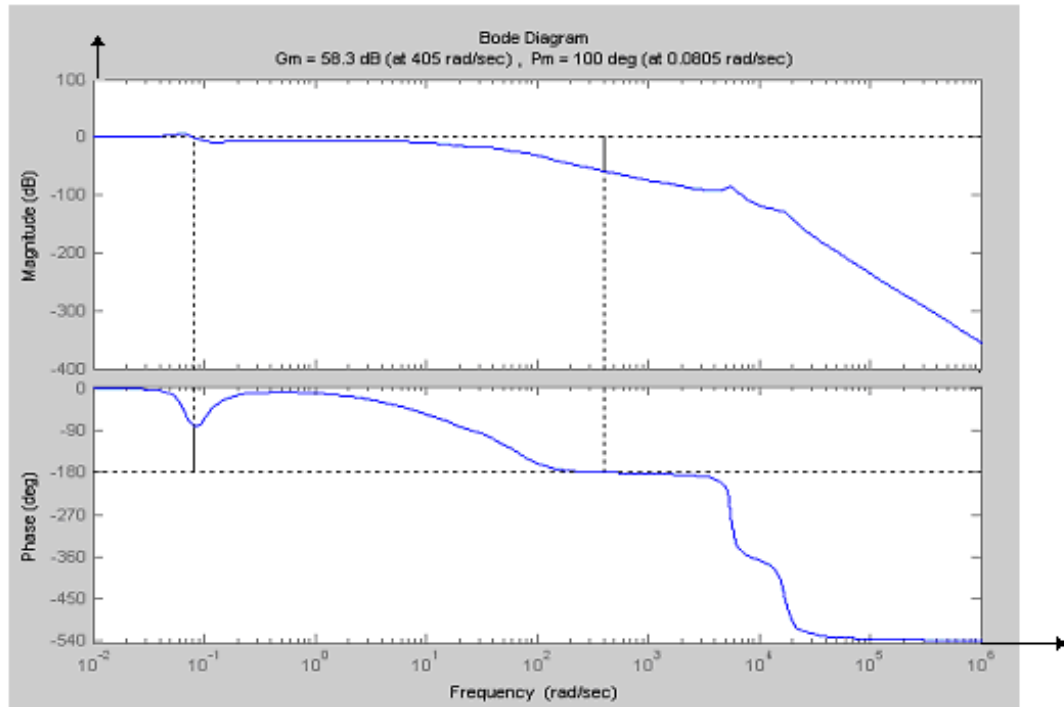


Рисунок 5.7 – Характеристики ЛАЧХ і ЛФЧХ по збурювальній дії

Знайдені запаси стійкості по амплітуді і по фазі зведемо до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Запаси стійкості

Gm	58,3
Pm	100

Встановлення того, що система стійка недостатньо для того щоб охарактеризувати ефективність її роботи. Для цього систему потрібно дослідити на якість по збурювальній дії. Використавши команду Matlab `step(sys)` отримаємо перехідний процес за яким дослідимо систему на якість. Графік перехідної характеристики зображений на рисунку 5.8.

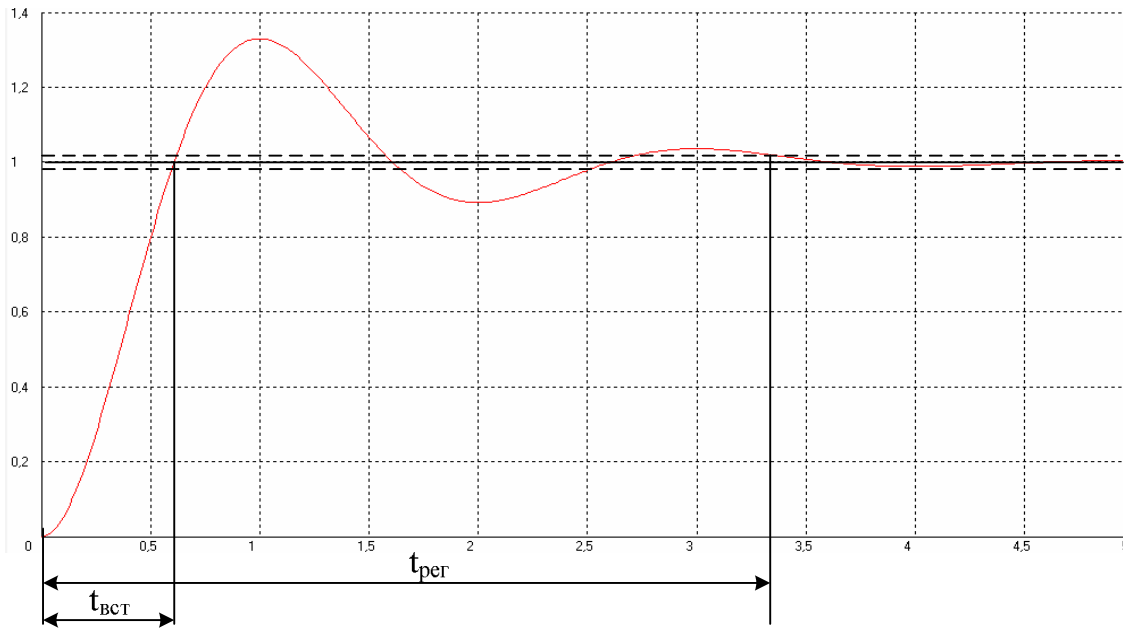


Рисунок 5.8 – Перехідна характеристика по системи

По перехідному процесі знайдемо показники якості:

- час встановлення:

$$t_{вст} = 0,62(с);$$

- усталене значення – значення на якому стабілізується система:

$$H_{уст} = 1;$$

- максимальне значення:

$$H_{max} = 1,35;$$

- перерегулювання:

$$\sigma = \frac{H_{max} - H_{уст}}{H_{уст}} \cdot 100\%, \quad (8.1)$$

$$\sigma = \frac{1,35 - 1}{1} \cdot 100\% = 35\%;$$

- час регулювання:

$$t_p = 3,35(с);$$

- кількість коливань:

$$N = 2;$$

- частота коливань:

$$f = \frac{N}{t_p}; \quad (8.2)$$

$$f = \frac{2}{3,35} = 0,598.$$

Висновок:

Аналізуючи перехідний процес, можна зробити висновок стосовно того, що система має гарні показники якості, а перерегулювання перевищує нормоване значення лише на 5 %.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Об'єктом даної роботи є модернізація системи керування електропривода шахтного електровоза типу 7КА. В наш час широкого використання електромеханічних систем застосовується велика кількість різноманітного обладнання, яке при неправильному використанні негативно впливає на здоров'я працюючого персоналу. В умовах сучасного розвитку технічних систем, охорона праці являється важливою системою правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів, які спрямовані на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які впливають на електромонтерів та електрослюсарів, що здійснюють діагностику, обслуговування та ремонт електровоза на робочому місці:

Фізичні:

- підвищена та понижена температура повітря робочої зони;
- рухомі машини і механізми, незахищені рухомі елементи виробничого обладнання;
- підвищена та понижена температура поверхонь обладнання, матеріалів;
- недостатнє освітлення робочої зони;
- недостатність природного освітлення;
- небезпечний рівень напруги електричного кола, замикання якої може відбутися через тіло людини;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- підвищена вологість повітря;
- підвищена забрудненість робочого місця та робочих поверхонь (масла, оливи, змащувальні матеріали).

Психофізіологічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

- фізичні перевантаження (динамічні);
- нервово-психічні перевантаження (перевантаження аналізаторів та емоційні перевантаження).

6.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

6.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Залізничне управління зобов'язане створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці. Це забезпечить не лише безпечність умов праці, а й створить відповідний настрій всередині колективу.

Правильна організація робочого місця забезпечує раціональні рухи працюючого і скорочує до мінімуму витрати часу на пошук і використання інструменту і матеріалів.

На робочому місці електромонтерів повинні знаходитись: технологічне оснащення, організаційне оснащення, посадова інструкція, електричні схеми головних електроустановок, схеми живлення цеху або ділянки, експлуатаційний журнал, інструкція з техніки безпеки, графіки оглядів і змінно-годинний показчик-календар місцезнаходження електромонтера. Робоче місце повинно бути оформлено у відповідності до вимог технічної естетики.

У всіх випадках на робочому місці повинен бути зразковий порядок: інструменти пристосування (дозволяється користуватися тільки справним інструментом) необхідно розміщувати на відповідних місцях, туди ж потрібно класти інструмент після закінчення роботи з ним, на робочому місці не повинно бути нічого зайвого, що не вимагається для виконання даної роботи, оснащення та утримання робочого місця повинно строго відповідати

всім вимогам охорони праці, техніки безпеки, виробничої санітарії і гігієни і виключати можливість виникнення пожежі.

6.1.2 Електробезпека

Живлення електропривода, що модернізується відбувається від мережі постійного струму напругою 250 В.

У приміщенні де здійснюється техогляд, обслуговування та ремонт локомотивів використовується трифазна чотирипровідна мережа із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В. Відповідно з ГОСТ 12.1.013-78 умови праці за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у робочих приміщеннях є струмопровідною.

Загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з ГОСТ 12.2.003-74, в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання любого виду і призначення.

Згідно із ГОСТ 12.1.030-81, в якості захисту від ураження людей електричним струмом застосовується заземлення. Крім того безпека експлуатації при нормальному режимі роботи забезпечується застосуванням ізолювальних пристроїв, огороженням струмоведучих частин, використанням малих напруг. Особи, що обслуговують електроустановки повинні користуватися ЗІЗ - спецвзуття, рукавиці. Засоби захисту необхідно періодично випробувати, їх слід захищати від механічних пошкоджень, впливу факторів, що погіршують їх діелектричні властивості.

Висота розміщення струмоведучих частин напругою до 1 кВ у місцях, де працюють люди, повинна бути не менше 3,5 м. Необхідний постійний контроль за ізоляцією, тому що з плином часу відбувається старіння ізоляції, що може привести до пробоя і створити небезпеку при дотику людини до

ізолюваних проводів. Використовують наступні кольори для маркування ізоляції: чорна - для силових ланцюгів; червона - для ланцюгів керування.

В процесі експлуатації слід постійно контролювати стан контактних сполучень та ізоляції апаратури, відсутність слідів дуги та оплавлення ошиновування, опір ізоляції силових та освітлювальних мереж, правильність підключення. На всіх підготовлених місцях роботи після накладається заземлення вивіщується плакат "Працювати тут".

Заходи безпеки при технічному обслуговуванні електровозів:

1. При піднятому струмоприймачі можна оглядати, відрегулювати регулятор напруги і реле зворотного струму; розкривати кожух і регулювати регулятор тиску; замінювати перегорілі лампи освітлення і низьковольтні запобіжники при знеструмлених ланцюгах і виключених кнопках. Ніяких інших робіт з електричними апаратами і машинами робити не можна.

2. При піднятому струмоприймачі можна проводити огляд, перевірку, регулювання, ремонт механічного обладнання, якщо це не пов'язано з перебуванням під електровозом.

3. Перед оглядом електрообладнання високої напруги, коли електровоз знаходиться під контактним дротом, слід: опустити струмоприймачі; вийняти ключ кнопкового вимикача; переконатися за показаннями вольтметра і додатково візуально, що струмоприймачі опустилися розблокувати ключем кнопкового вимикача дахові роз'єднувачі, відключити їх і заблокувати в цьому положенні; вийняти ключ; відключає штангою врубати шинний роз'єднувач і відключити вимикачі управління в кабінах машиніста.

4. Тягові двигуни оглядають при відключених ножах комутації двигунів.

5. При відключенні високовольтних кіл користуються гумовими високовольтними рукавичками. Категорично забороняється проводити

тимчасові з'єднання високовольтних ланцюгів прокладкою проводів в кабінах, коридорах і високовольтній камері.

6. При огляді акумуляторної батареї необхідно користуватися закритим джерелом світла (забороняється користуватися сірниками, факелом). Вихід на дах через люк при знаходженні електровоза під контактним дротом, крім виконання перерахованих заходів, дозволяється тільки після зняття напруги в контактній дроті і заземлення його в установленому відповідною інструкцією порядку.

7. При огляді і ремонті електровоза ключ кнопкового вимикача і реверсивна рукоятка повинні знаходитися у відповідальній особи, що виконує ці роботи.

8. Порядок робіт по екіпіровці електровоза, установці і виведення його з будівлі депо (пункту огляду), обточуванні бандажів колісних пар і колекторів тягових двигунів без викочування їх з-під електровоза повинен виконуватися при суворому дотриманні вимог техніки безпеки, передбачених відповідними діючими на дорозі інструкціями. У всіх випадках забороняється проводити будь-які роботи по виявленню несправностей і входити при русі електровоза, обертанні якорів допоміжних машин, розблокованих кнопкових вимикачах.

9. Після закінчення огляду та ремонту перед підйомом струмоприймача необхідно переконатися в тому, що всі роботи закінчені; зайві предмети і інструмент прибрані; відключені при огляді електровоза апарати повернуті в своє робоче положення; знімні кожухи і кришки встановлені на місце; немає нікого під кузовом і на даху електровоза.

10. Категорично забороняється обслуговуючому персоналу при підйомі струмоприймача і приведення електровоза в робочий стан застосовувати особисті реверсивні рукоятки, ключі кнопкових вимикачів та інші блокувальні пристрої, а також користуватися їх заміною пристосуваннями. Перед підйомом струмоприймача необхідно дати попереджувальний сигнал.

11. Категорично забороняється видача електровоза на лінію з несправними захисними пристроями, зі знятими захисними кожухами або кришками високовольтного обладнання і жолобів високовольтної проводки. При зміні машиністом кабіни управління слід відключити всі кнопки управління і вимикач управління В залишаємо кабіні, заблокувати і вийняти ключ із кнопкового вимикача, а також реверсивну рукоятку з контролера машиніста, розрядити ГМ і зняти ручку пристрою блокування гальм. Тільки після цього можна змінити кабіну управління. Категорично забороняється входити при русі електровоза з опущеними струмоприймачами аж до повної його зупинки.

12. Перевірка електричної міцності ізоляції електричних машин на випробувальній установці повинна проводитися тільки за сітчастою огорожею. Вхідні двері огорожі повинні бути заблоковані з первинним ланцюгом трансформатора таким чином, щоб подача високої напруги була можлива тільки із зачиненими дверима. Електроди слід приєднувати в діелектричних рукавичках, стоячи на діелектричному килимку.

13. Місця стендових випробувань високовольтного електричного та електронного обладнання повинні бути огорожені.

14. Під час огляду та перевірки електрообладнання під напругою до 1000 В працівник повинен застосовувати ЗІЗ (діелектричні килимки, діелектричні рукавички та галоші).

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та технічної санітарії

Категорія робіт - розмежовування робіт за тяжкістю на основі загальних енерговитрат організму (Вт).

Головним завданням будь-якої галузі промисловості є збільшення продуктивності праці. Разом з тим, людина, що працює, проводить на виробництві значну частину свого життя. Тому для її нормальної життєдіяльності в умовах виробництва треба створити санітарні умови, які б

дали змогу їй плідно працювати, не перевтомлюючись, та зберігати своє здоров'я.

Для цього треба, щоб енергетичні витрати при праці компенсувалися відпочинком та умовами оточуючого середовища. Ці умови створюються забезпеченням для працюючого: зручного робочого місця; чистого повітря; нормованої освітленості; захисту від шуму та вібрації; робочим одягом та різними засобами індивідуального захисту.

6.2.1 Мікроклімат

Суттєвий вплив на стан організму працівника, його працездатність здійснює мікроклімат (метеорологічні умови) у виробничих приміщеннях, під яким розуміють клімат внутрішнього середовища цих приміщень, що визначається діючою на організм людини сукупністю температури, вологості, руху повітря та теплового випромінювання нагрітих поверхонь.

На відміну від мікроклімату житла та громадських споруд мікроклімат виробничих приміщень характеризується значною динамічністю і залежить від коливань зовнішніх метеорологічних умов часу доби та пори року, теплофізичних особливостей технологічного процесу, умов опалення та вентиляції.

Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні оптимальних параметрів мікроклімату не повинні бути більше ніж на 2°C за діапазон норм. Якщо температура поверхонь вище чи нижче оптимальної температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1 м.

Основні джерела теплоти бажано розміщувати безпосередньо під аераційним ліхтарем, біля зовнішніх стін будівлі і в один ряд на такій відстані один від одного, щоб теплові потоки від них не перехрещувались на робочих місцях. Для охолодження гарячих виробів необхідно передбачити

окремі приміщення. Найкращим рішенням є розміщення тепловипромінюючого обладнання в ізольованих приміщеннях або на відкритих ділянках.

Допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничого приміщення приводяться в таблиці 9.1.

Таблиця 6.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні виробничих приміщень з категорією робіт 1б

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий Холодний	Середньої важкості Па	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
		17-23	До 75%	не більше 0,3

Вентиляція повітря робочої зони відповідно до відбувається через нещільно закриті вікна і через встановлену в лабораторії вентиляційну шахту.

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено:

1. Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні оптимальних параметрів мікроклімату не повинні бути більше ніж на 2°C за діапазон норм.

2. Якщо температура поверхонь вище або нижче оптимальної температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них.

6.2.2 Склад повітря робочої зони

Робочою зоною вважається простір, який обмежений огорожуючими конструкціями виробничих приміщень, що мають висоту 2 м над рівнем підлоги або площини, на яких знаходяться місця постійного або непостійного перебування працюючих. Склад повітря робочої зони залежить від складу

атмосферного повітря і впливу на нього ряду шкідливих виробничих факторів, утворених в процесі трудової діяльності людини. Склад повітря залишається постійним. Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м.

Можливі забруднювачі повітря і їх ГДК наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Можливі забруднювачі повітря і їх ГДК

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів по очищенню області. Необхідно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (зернистість), тим вище небезпека.

Для забезпечення складу повітря робочої зони відповідно до ГОСТу 12.1.004-91. ССБТ проектом передбачені наступні рішення [18]:

- застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами , які встановленні безпосередньо на ділянках біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення;
- необхідно проводити контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні;
- застосовувати природну вентиляцію: організовану і неорганізовану.

6.2.3 Виробниче освітлення

Світло впливає не лише на функцію органів зору, а й на діяльність організму в цілому. При поганому освітленні людина швидко втомлюється, працює менш продуктивно, зростає потенційна небезпека помилкових дій і

нешасних випадків. Згідно з статистичними даними, до 5% травм можна пояснити недостатнім або нераціональним освітленням, а в 20% воно сприяло виникненню травм. Врешті, погане освітлення може призвести до професійних захворювань, наприклад, таких як робоча міопія (короткозорість), спазм акомодатції.

Виробниче освітлення використовується природне, штучне та суміщене. Природне та штучне освітлення нормується згідно в залежності від характеру зорової роботи, найменшого розміру об'єкта розрізнення, розряду і підрозряду зорової роботи, фона і контрасту об'єкта з фоном.

Природне освітлення.

Приміщення для обслуговування електровозів знаходиться в місті, система природного освітлення відноситься до бокової. Характеристика робіт у приміщенні – середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2006 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Норми освітленості при штучному освітленні занесені до таблиці 9.3.

Нормоване значення КПО для даного виробничого приміщення розраховуємо за формулою:

$$e_N = e_n \cdot m_N,$$

m_N – коефіцієнт світлового клімату ($m_N=0,9$).

Таблиця 6.3 – Норми освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи		Середньої точності
Найменший розмір об'єкта розрізнювання		Вище 0,5 до 1
Розряд зорової роботи		IV
Підрозряд зорової роботи		в
Контраст об'єкта розрізнювання з фоном		Середній, малий
Характеристика фона		Середній, темний
Освітленість, лк	Комбіноване	400
	Загальне	200
КЕО, e_n , %	Природне	1,5
	Суміщене	0,9

Природне освітлення одностороннє і здійснюється через вікна, які орієнтовані на схід.

Природне освітлення:

$$e_N = 1,5 \cdot 0,85 = 1,3\%.$$

Суміщене освітлення:

$$e_N = 0,9 \cdot 0,85 = 0,8\%.$$

Штучне освітлення.

Правильна експлуатація установок природного і штучного освітлення відіграє важливу роль для створення високого рівня освітленості в приміщеннях і економії електроенергії, що витрачається на штучне електричне освітлення.

Для освітлення ремонтного відділу вибираємо світильники прямого світла ЛПО-02 з двома люмінесцентними лампами. Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра.

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

Надійність та ефективність природного і штучного освітлення залежить від своєчасності і ретельності їх обслуговування. Забруднення скла світлових отворів, ламп та світильників може знизити освітленість приміщень в 1,5—2 рази. Тому вікна необхідно мити не рідше двох разів у рік для приміщень з незначним виділенням пилу і не рідше чотирьох разів — при значному виділенні пилу. Періодичність чищення світильників — 4—12 разів на рік (залежно від характеру запиленості виробничих приміщень).

Періодично, не рідше одного разу на рік, необхідно перевіряти рівень освітленості в контрольних місцях виробничого приміщення. Основний прилад для вимірювання освітленості — люксметр.

6.2.4 Виробничий шум

Шум — будь-який небажаний звук, котрий заважає. Виробничим шумом називається шум на робочих місцях, ділянках або на територіях підприємств, котрий виникає під час виробничого процесу.

Наслідком шкідливої дії виробничого шуму можуть бути професійні захворювання, підвищення загальної захворюваності, зниженні працездатності, підвищення ступеня ризику травм та нещасних випадків пов'язаних з порушенням сприйняття попереджувальних сигналів порушення слухового контролю функціонування технологічного обладнання, зниження продуктивності праці.

За характером порушення фізіологічних функцій шум поділяється на такий, що заважає (перешкоджає мовному зв'язку), подразнювальний (викликає нервові напруження і внаслідок цього — зниження працездатності, загальну перевтому), шкідливий (порушує фізіологічні функції на тривалий період і викликає розвиток хронічних захворювань, котрі безпосередньо або опосередковано пов'язані зі слуховим сприйняттям, погіршення слуху, гіпертонію, туберкульоз, виразку шлунку), травмуючий (різко порушує фізіологічні функції організму людини). В робочому приміщенні підприємства, джерелом шуму є машини, механізми та верстати - механічний шум. Найбільш раціональний спосіб - пониження шуму в джерелі або зміна напрямку його випромінювання. Однак вони потребують конструкторської переробки джерела, яке випромінює шум або механізму в цілому, що є несприятливими.

Допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку у виробничому приміщенні приведені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Допустимі рівні звукового тиску та рівня звуку

Вид трудової діяльності, робоче місце	Рівні звукового тиску, дБ в октавних полосах із середньгеометричними частотами, Гц								
	1,5	3	25	50	500	1000	2000	4000	8000
На постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях	107	95	7	82	78	75	73	71	69

Пониження рівня шуму, який проникає з джерела утворення назовні можна отримати шляхом підвищення рівня звукоізоляції огорожуючи конструкцій. Звукопоглинання є найбільш простим і в той же час достатньо ефективним способом зменшення шуму у виробничих приміщеннях. Звукопоглинаюче облицювання слід розміщувати на стелі та верхній частині стін (вище 1,5 – 2 м). Найбільше поглинання шуму досягається при облицюванні більше 60 % площі від загальної площі поверхонь приміщення. Ефект поглинання шуму збільшується зі зменшенням висоти приміщення.

6.2.5 Виробничі вібрації

Вібрація відноситься до факторів, які мають велику біологічну активність. Як загальна, так і локальна вібрація несприятливо впливає на організм людини, викликає зміну у функціональному стані вестибулярного апарату, центральної нервової, серцево-судинної систем, погіршує самопочуття та може призвести до розвитку професійних захворювань.

За допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях приведені в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Середньоквадратичні значення віброприскорення та віброшвидкості

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	6	0,5	3	25	250	500	1000
Загальна вібрація: на пост. Роб. місцях у вироб. Прим.	$\frac{1,3}{108}$	$\frac{0,45}{99}$	$\frac{0,22}{93}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	-	-	-	-
Локальна вібрація	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	-	-	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	-	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$

* В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с 10-2, в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

- динамічне погашення вібрації - приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи;

- зміна конструктивних елементів машин;

застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

Висновки: Проведено огляд та планування заходів щодо безпечної експлуатації об'єкта дослідження із врахуванням режимів його функціонування.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було проаналізовано роботу електропривода та системи керування тяговим приводом з двигунами змінного струму контактного шахтного електровоза типу 7КА.

Отримані такі результати дослідження:

1. Розглянуто загальні експлуатаційні та технічні характеристики об'єкта дослідження.

2. Проведені розрахунки для вибору потужності двигунів електровозу, виконані розрахунки та побудова навантажувальної діаграми досліджуваного електропривода. Розрахункова потужність приводного двигуна складає 34 кВт.

3. Проведені розрахунки економічної доцільності використання найбільш оптимального з технічної та економічної точки зору варіанту системи електропривода електровоза типу 7КА. Вибрано в якості системи ЕП систему ПЧ-АД.

4. Оцінено переваги контактно-акумуляторних електровозів із запропонованим асинхронним тяговим електромеханічним комплексом порівняно з традиційними контактними електровозами:

- усунення контактного проводу в найбільш небезпечних ділянках (вантажні виробки) суттєво підвищує безпеку робіт;

- ліквідовано витрати на спорудження та експлуатацію контактних мереж у навантажувальних виробках, які складають близько 30 % довжини загальної контактної мережі шахт;

- використання частотно керованого асинхронного приводу дозволяє знизити витрати електроенергії на транспорті на 25–30 %;

- витрати на ремонт і експлуатацію асинхронних тягових двигунів у 4–5 разів менші, ніж у двигунів постійного струму;

- застосування безконтактного регулювання замість силових контролерів значно підвищує надійність системи керування;
- збільшення маси електровоза та плавне регулювання дозволяють підвищити вантажопідйомність на 20–30 %;
- дистанційне керування електровозом при вантажно-розвантажувальних роботах зменшує трудовитрати і підвищує продуктивність;
- автоматизація процесів керування підвищує ефективність та спрощує роботу машиніста;
- відсутність контактного дроту в зонах навантаження усуває небезпечні операції з струмознімачем, вилучення силового контролера підвищує безпеку роботи машиністів.

5. Проведено моделювання досліджуваної системи електроприводу з метою перевірки відповідності поведінки системи реальним фізичним та електромеханічним процесам. Досліджено систему на стійкість та якість.

6. Сформульовано основні положення щодо безпечної експлуатації шахтного електровоза в умовах дії шкідливих чинників промислового середовища.

7. В роботі використовувалися математичні програми ППП “Matlab” та ППП «Mathcad». Графічні матеріали виконувалися в Microsoft Visio.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Beshta O.S. Electric drives adjustment for improvement of energy efficiency of technological processes, Scientific Bulletin NSU, 2012, Vol. 4, pp. 98-107. The original source of material:

<http://nv.nmu.org.ua/index.php/ru/component/jdownloads/finish/34-04/530-2012-4-beshta/0>.

2. Белов М. П. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів: підручник для студ. вищ. навч. закладів / М.П. Белов, В.А. Новіков, Л. Н. Розсудів. - 3-є изд., вип. - М.: Видавничий центр Академіям, 2007. - 576 с. ISBN 978-5-7695-4497-2

3. Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина : навч. посібник / В. Х. Далека, М. В. Хворост, В. І. Скуріхін, Д. І. Скуріхін. ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 388 с.

4. Довгань С.М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання. - Дніпропетровськ: НГА України, 2001. -137с.

5. Голуб А.П., Кузнецов Б.І., Опришко І.О., Соляник В.П.. Системи керування електроприводами: Навчальний посібник. - К.: НМК ВО, 1992. – 352 с.

6. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; За ред. П.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. - К.: Либідь, 2005. - 680 с.

7. Грабко В. В. Системи керування електроприводами. Розрахунок системи підпорядкованого керування електроприводом стрічкового конвеєру. Курсове та дипломне проектування, навчальний посібник / Грабко В. В., Розводюк М. П., Грабко В. В. – Вінниця : ВНТУ. – 2010. – 89 с.

8. Белов М. П. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів: підручник для студ. вищ. навч. закладів / М.П. Белов, В.А. Новіков, Л. Н. Розсудів. - 3-є изд., вип. - М.: Видавничий центр Академіям, 2007. - 576 с. ISBN 978-5-7695-4497-2

9. Розподілені мікропроцесорні системи: конспект лекцій [Електронний ресурс]: для підготовки докторів філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікація за спеціальністю 171 Електроніка за спеціалізацією «Електронні системи» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Т. О. Терещенко – Електронні текстові данні (1 файл:5544 кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 192 с.

10. Програмувальні інтелектуальні реле [Електрон. ресурс] – Режим доступу: <http://muromremont.ru/639-post>

11. Логвінова Н. О. Зменшення експлуатаційних витрат за допомогою енергооптимального руху поїздів / Н. О. Логвінова, Д. О. Босий, О. М. Полях. – Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 110–113.

12. Визначення енергозаощаджуючих режимів ведення поїздів / Д. М. Кислий. – Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2016, № 1 (61). – С. 71 – 84.

13. Казачковський М. М. Комплектні електроприводи: Навчальний посібник. - Дніпропетровськ :Національний гірничий університет,2003.-226 с.

14. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. - 404 с.

15. Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й. Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. Моделювання електромеханічних систем. – Кременчук, 2001. – 376 с.

16. Воронов Р.В – Дисертація: «Тягові електромеханічні системи з живленням двох двигунів від одного інвертора», Харків 2020 1-97с.

17. Казачковський М. М. Комплектні електроприводи: Навчальний посібник. - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003 – 226 с.
18. Zagirnyak M., Romashykhina Zh., and Kalinov A., (2013), Improved Reliability of Diagnostics of In duction Motor Broken Rotor Bars, Proceedings of the XVI International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronics En gineering, Ohrid, Macedonia, 2 – 14th September.
19. Кобилянський О.В., Терещенко О.П. Методичні вказівки щодо опрацювання розділу охорона праці в дипломних проектах і роботах студентів електротехнічних спеціальностей. – Вінниця 2003. –46 с.управления моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами. Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 4.
20. Модернізація системи керування електропривода транспортної лінії припортового заводу / О.А. Паянок, М.М. Матевосян – Матеріали конференції «LII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету», Вінниця, 2023. [Електронний ресурс]. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2023/paper/view/17445/14518> – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 3 с.
21. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
22. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profdom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv>.
23. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48644.

Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРІЗ

« 4 » березня 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на бакалаврську дипломну роботу

МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА

08-24.БДР.021.00.000 ТЗ

Керівник роботи

к.т.н., доц.

Володимир БОГАЧУК

« 4 » березня 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕМСА-216

Павло ТОПОЛЬНИЦЬКИЙ

« 4 » березня 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки – «Модернізація системи керування тягового електропривода шахтного електровоза».

Скорочене найменування розробки – «Модернізація системи керування тягового електропривода шахтного електровоза».

Замовник – Кафедра компютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем бакалаврських дипломних робіт.

3 Призначення розробки і галузь використання

Локомотивний транспорт є основним видом транспорту на шахтах гірничодобувної промисловості і служить для перевезення основних і допоміжних вантажів, перевезення людей і виробництва маневрових робіт.

Метою дослідження в даній роботі є покращення експлуатаційних характеристик системи електропривода електровоза із використанням в якості тягових двигунів змінного струму за рахунок вдосконалення існуючої системи електроприводу та системи керування тяговими двигунами. В якості об'єкта дослідження в даній роботі вибрано електровоз типу 7КА, який належить до числа досить поширених засобів шахтних перевезень.

4 Вимоги до розробки

Основна увага при створенні нових локомотивів приділено: підвищення швидкості руху електровозів; збільшення енергоємності акумуляторних батарей; підвищення тягових і гальмівних властивостей; уніфікації вузлів і деталей; забезпечення безпеки руху та комфортності роботи машиніста.

Вибір локомотиву відповідної категорії вибухобезпеки шахт проводиться па підставі техніко-економічного розрахунку за умовою мінімуму приведених витрат на локомотивну відкатку. Виробнича потужність шахти (горизонту) і відстань транспортування є основними факторами, що впливають на вибір маси локомотива, а також типу і вантажопідйомності.

5 Комплектація розробки

Основними блоками тягового електроприводу контактного електровоза є: пульт управління, система управління електроприводом з інверторами І1, І2 і гальмівним чоппером VT, блок живлення кіл управління і освітлення БП, зарядний пристрій ЗУ, акумуляторна батарея АБ, тягові асинхронні двигуни М1, М2.

6 Технічні характеристики

Найменування параметрів ДТРН-34/25АС	Норми	
	Режим роботи по ГОСТ 183	
	S2-60 хв (годинний)	S1 (тривалий)
Номінальна потужність, кВт	34	25
Номінальна напруга, В	250	250
Номінальний струм, А	153	113
Номінальна частота обертання, об/хв	1050	1200
Максимальна частота обертання, об/хв.	3000	
Напрямок обертання	реверсивне	
Виконання	рудничне нормальне	
Рівень ізоляції по ГОСТ 24719	І	
Степінь захисту по ГОСТ 14254	IP43*	
Спосіб охолодження по ГОСТ 20459	IC01	
Маса, кг	500	

7 Елементна база

Схема включає в себе:

– асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, який перетворює електричну енергію джерела в механічну енергію обертання ротору;

- джерело електричного живлення, який перетворює напругу постійного струму акумулятора в трифазну напругу змінного струму, кероване за амплітудою і частотою;
- пристрій завдання частоти обертання, яке виробляє сигнал необхідного для забезпечення режиму роботи приводу з постійною потужністю;
- пристрій завдання значення напруги, яке виробляє сигнал, необхідного для забезпечення обертаючого моменту при зміні частоти обертання;
- контролер, за допомогою якого машиніст електровозу задає бажану швидкість руху.

8 Конструктивне виконання

Електропривод виготовляється окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки у пило-вологозахищеному виконанні.

9 Показники технологічності

Пульт управління, система управління електроприводом з інверторами І1, І2 і гальмівним чоппером VT, блок живлення кіл управління і освітлення БП, зарядний пристрій ЗУ, акумуляторна батарея АБ, тягові асинхронні двигуни М1, М2. Схема виконується на сучасній елементній базі, її монтаж, заземлення, струмопровід повинні відповідати правилам улаштування електроустановок.

10 Джерела розробки

1. Beshta O.S. Electric drives adjustment for improvement of energy efficiency of technological processes, Scientific Bulletin NSU, 2012, Vol. 4, pp. 98-107. The original source of material:

<http://nv.nmu.org.ua/index.php/ru/component/jdownloads/finish/34-04/530-2012-4-beshta/0>.

2. Белов М. П. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів: підручник для студ. вищ. навч. закладів / М.П. Белов, В.А. Новіков, Л. Н. Розсудів. - 3-є изд., вип. - М.: Видавничий центр Академіям, 2007. - 576 с. ISBN 978-5-7695-4497-2

3. Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина : навч. посібник / В. Х. Далека, М. В. Хворост, В. І. Скуріхін, Д. І. Скуріхін. ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 388 с.

4. Довгань С.М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання. - Дніпропетровськ: НГА України, 2001. -137с.

5. Голуб А.П., Кузнєцов Б.І., Опришко І.О., Соляник В.П.. Системи керування електроприводами: Навчальний посібник. - К.: НМК ВО, 1992. – 352 с.

11 Технічне обслуговування і ремонт

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-електромонтажниками відповідної кваліфікації. Технічний огляд пристрою здійснюється мінімум один раз на місяць. Ремонт здійснюється інженерами-електромеханіками фахівцями з електромеханічних систем автоматизації та електропривода.

12 Живлення електропривода

Контактні електровози працюють від контактної мережі постійного струму на напругу $U = 250$ В. Акумуляторні електровози від тягових шахтних акумуляторних батарей.

При відсутності контактного проводу живлення тягового приводу і інших пристроїв електровоза здійснюється від допоміжної акумуляторної

батареї АБ. Необхідна ємність батареї становить приблизно 350 - 400 А год, номінальна напруга 80 В. З такими параметрами виготовляються комплектні батареї для електронавантажувачів.

13 Порядок контролю та прийняття

Виконання етапів графічної та розрахункової документації бакалаврської дипломної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

14. Матеріали, що подаються до захисту БКР

Пояснювальна записка БКР, ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту БКР на кафедрі, відгук наукового керівника, відгук рецензента, протоколи складання державних іспитів, анотації до БКР українською та іноземною мовами, довідка про відповідність оформлення БКР діючим вимогам.

15. Вимоги до оформлення БКР

Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційні роботи у Вінницькому національному технічному університеті (БКР, МКР)», 2024 р.

Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА

Об'єктом бакалаврської кваліфікаційної роботи є процеси, що протікають у електротехнічній системі керування електропривода шахтного електровоза.

Предметом бакалаврської кваліфікаційної роботи є характеристики та режими роботи електропривода шахтного електровоза та його системи керування.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності роботи системи електропривода електровоза шляхом її модернізації, зокрема вдосконалення як самого електропривода, так і системи керування тяговими двигунами змінного струму. Об'єктом дослідження обрано електровоз моделі 7КА, який є одним із найбільш поширених транспортних засобів, що використовуються для перевезень у шахтних умовах..

В процесі виконання поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

1. Провести аналіз основних технічних та експлуатаційних параметрів обраного об'єкта дослідження.
2. Виконати додаткові інженерні розрахунки для визначення необхідної потужності тягових двигунів, а також побудувати навантажувальну характеристику електропривода.
3. Оцінити економічну ефективність впровадження оптимального з технічної та фінансової точки зору варіанту електроприводної системи для електровоза моделі 7КА.
4. Обґрунтувати вибір сучасної системи керування для електровоза типу 7КА, яка базується на застосуванні асинхронних двигунів змінного струму та заміні застарілої релейної автоматики на мікропроцесорне керування. Очікується, що така модернізація забезпечить вищу надійність, гнучкість налаштування та зниження енерговитрат електропривода.
5. Здійснити комп'ютерне моделювання запропонованої системи керування з метою перевірки її відповідності фізичним і електромеханічним процесам у реальних умовах експлуатації.
6. Розробити рекомендації з безпечної експлуатації шахтного електровоза з урахуванням шкідливих факторів, характерних для промислового середовища.

Загальна характеристика, будова, особливості механізму

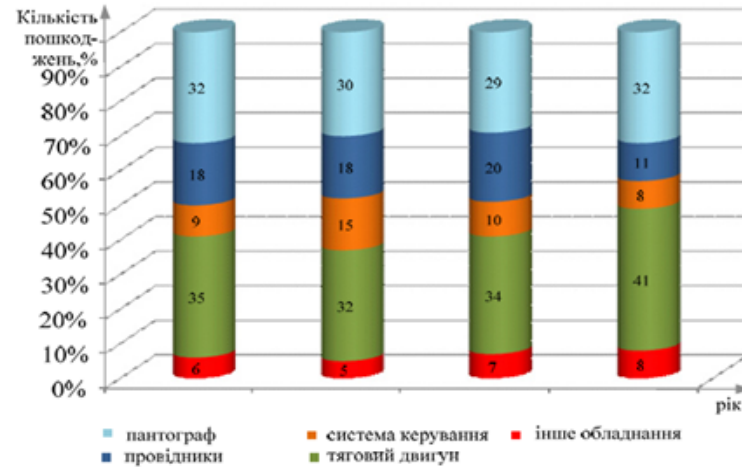


Рисунок 1.2 – Контактний електровоз 7КА

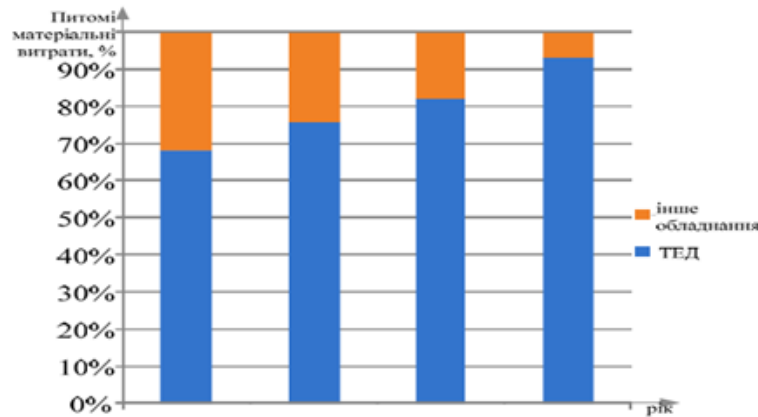


Рисунок 1.1 – Динаміка зміни показників кількостей пошкоджень електроустаткування та питомих матеріальних витрат на ремонт електровозів 7КА

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики електровоза 7КА

№ п/п	Найменування основних параметрів та розмірів	Од. вим.	Показник
1.	Зчіпна маса	кг	10000
2.	Номинальна напруга на струмоприймачі	В	250+75/-50
3.	Швидкість при годинному режимі	км/ч	12,2
4.	Потужність електродвигунів в годинному режимі	кВт	2х33
5.	Тягове зусилля в годинному режимі	кН	18
6.	Ширина колії	мм	600/750,900
7.	Довжина по буферам	мм	4600
Ширина по виступаючим частинам:			
8.	-для колії 600	мм	1050
	-для колії 750		1350
	-для колії 900		1350
9.	Висота по кабіні машиніста	мм	1550
10.	Жорстка база	мм	1200
11.	Кліренс (дорожній просвіт)	мм	115
12.	Зовнішній діаметр бандажу	мм	680

Кінематика електропривода

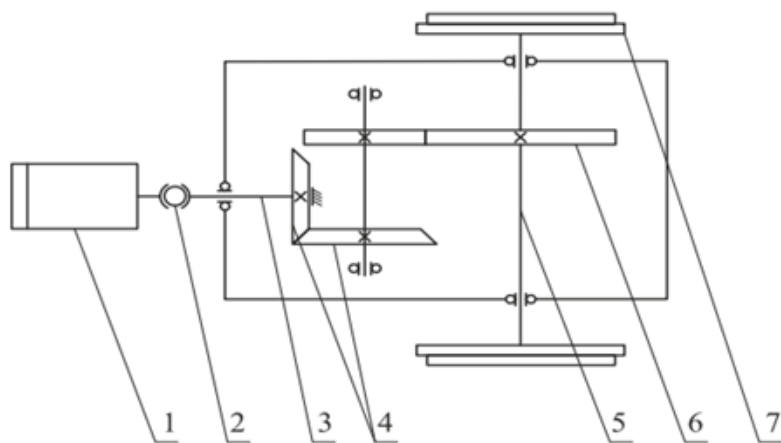


Рисунок 2.1 – Загальна кінематична схема шахтного електровозу

На рисунку 1.4 наведені такі позначення:

- 1 – тяговий електричний двигун;
- 2 – гнучка муфта;
- 3 – вал провідної конічної шестірні;
- 4 – пара конічних шестірень;
- 5 – вісь колісної пари;
- 6 – пара циліндричних шестірень;
- 7 – колеса електровоза.

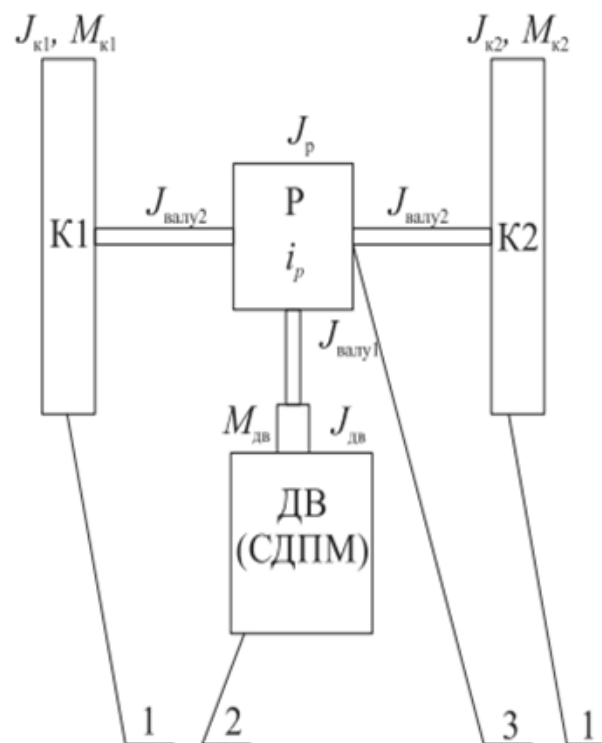


Рисунок 2.2 – Схема моментів інерцій, що діють на механічну систему електровозу:

- 1 – приводні колісні пари;
- 2 – якорь двигуна;
- 3 – вали редуктора

Техніко-економічне обґрунтування вибору СЕП

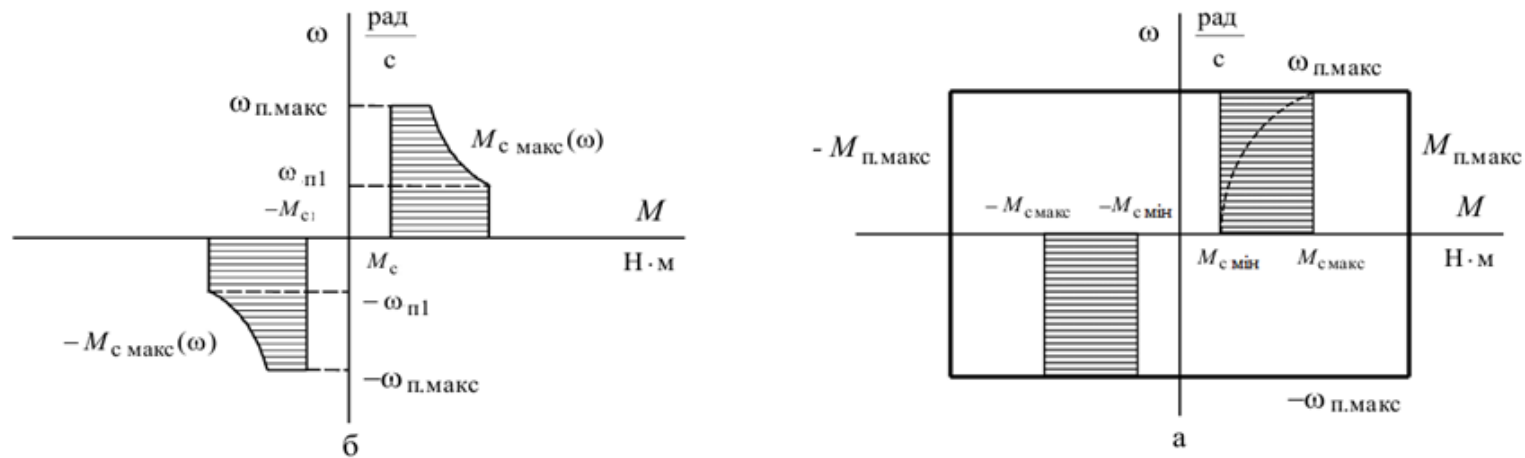


Рисунок 3.1 – Задана сфера роботи електроприводу: а – однозонного ЕП; б – двозонного ЕП

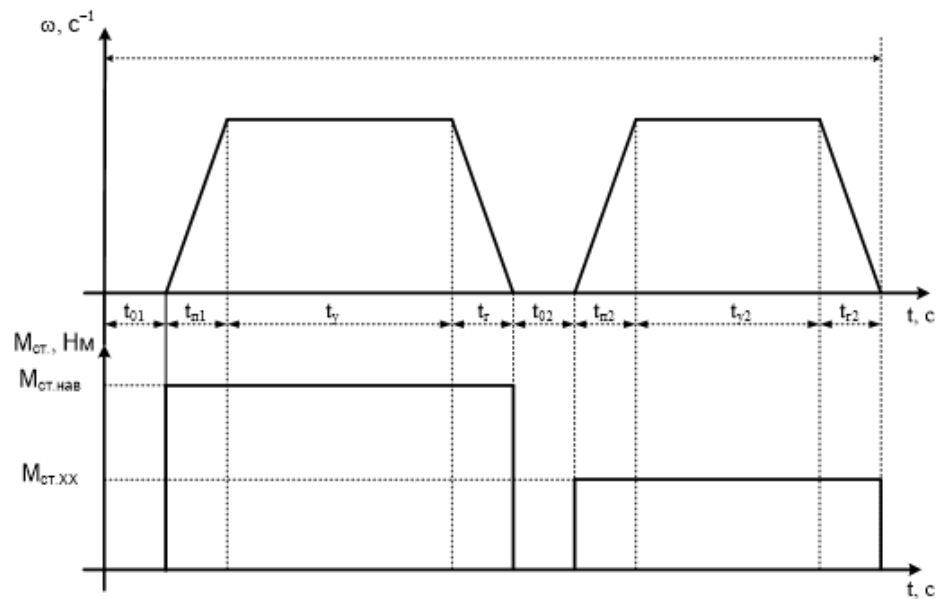


Рисунок 3.2 – Тахограма та статичні моменти механізму пересування шахтного електровоза

Техніко-економічне обґрунтування вибору СЕП

Таблиця 3.1 – Економічне порівняння варіантів систем електропривода

Показники	Тип системи електроприводу			
	ТП-ДПС	ШП-ДПС	РКС-ДПС	ПЧ-АД
Розрахована Рн двигуна, кВт	35			
Вартість двигуна (Д), грн.	0	0	0	48520
Вартість системи керування (СК), грн.	46860	43686	56200	31440
Капіталовкладення $K = Д + СК$, грн	46860	43686	56200	79960
Амортизаційні відрахування, $Ca = Ea * K$, грн.	2343	2184	2810	3998
Eo	0,015			
Витрати на обслуговування і ремонт, $Co = Eo * K$, грн.	703	655	843	1199
Витрати на електроенергію, грн	62300	61420	64820	53513
Собівартість $C = Ca + Co + C_{\text{ДВ}}$, грн.	65345,9	64259,6	68473,0	58710,7
Зведені витрати $Z = En * K + C$, грн.	72374,9	70812,5	76903,0	70704,7

Вибір двигуна та його перевірка

Таблиця 4.1 – Паспортні дані двигунів

Найменування параметрів ДТРН-34/25АС	Норми	
	Режим роботи по ГОСТ 183	
	S2-60 хв (годинний)	S1 (тривалий)
Номинальна потужність, кВт	23,5	9,4
Номинальна напруга, В	185	185
Номинальний струм, А	152	61
Номинальна частота обертання, об/хв	900	1410
Максимальна частота обертання, об/хв.	2500	
Напрямок обертання	реверсивне	
Виконання	рудничне	
Рівень ізоляції по ГОСТ 24719	I	
Степінь захисту по ГОСТ 14254	IP54	
Спосіб охолодження по ГОСТ	IC01	



Рисунок 4.1 – Тяговий двигун
для контактного електровоза
типу ДТРН-23,5АС

Протитип системи керування ЕП шахтного електровоза

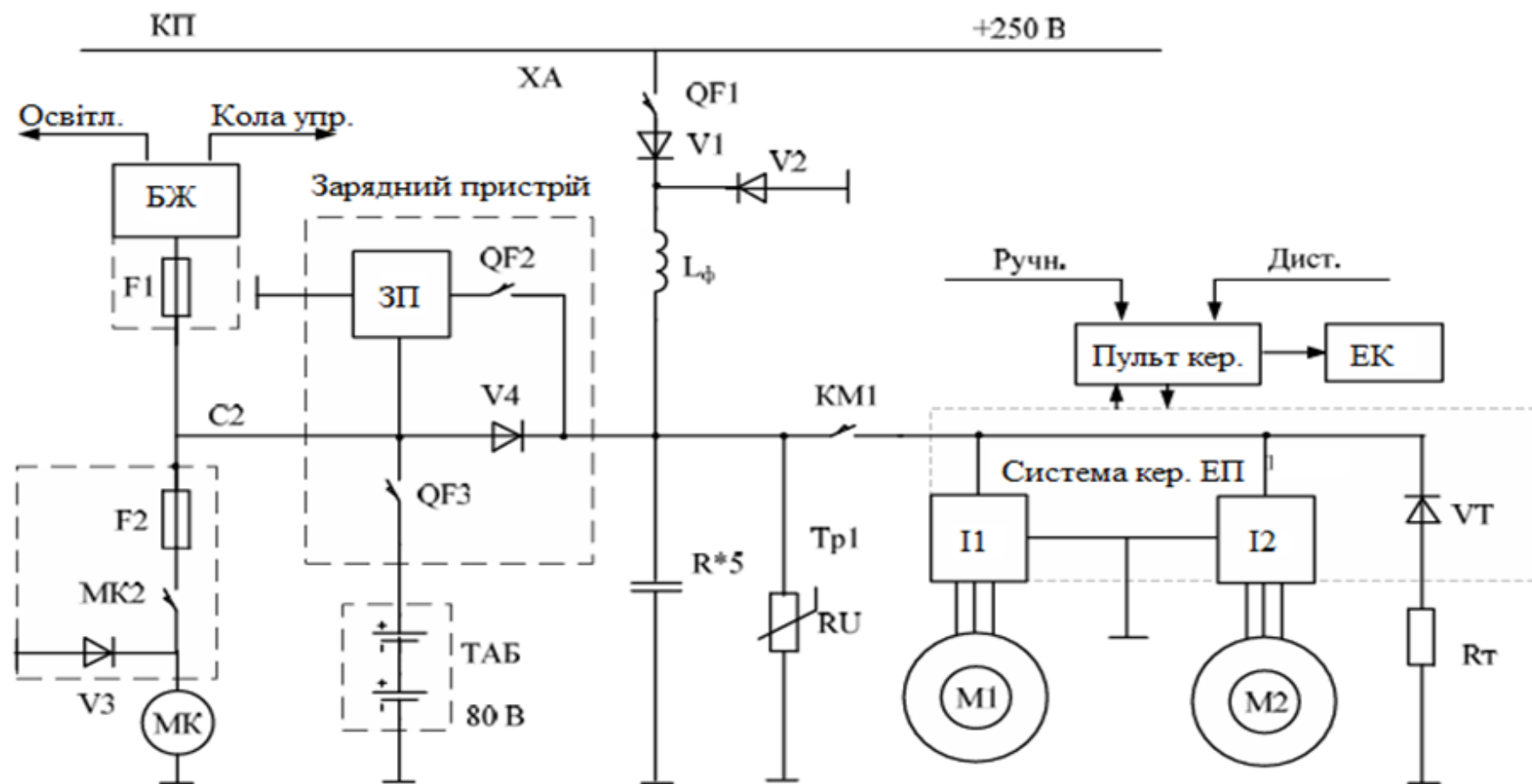


Рисунок 4.2 – Протитип системи керування ЕП шахтного електровоза на асинхронній тязі

Розробка схеми електричної структурної САЕП

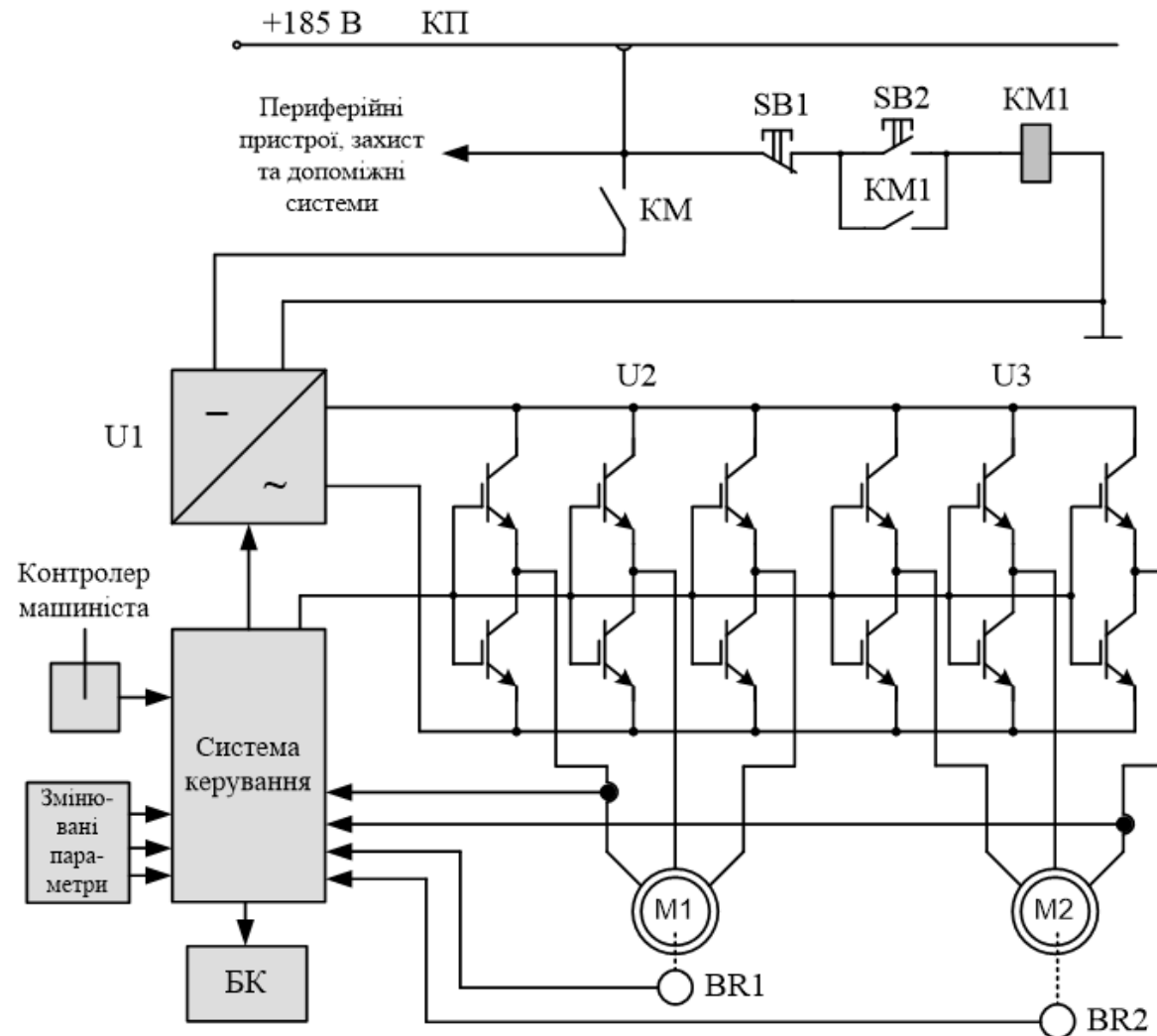


Рисунок 4.3 – Структурна схема силової частини асинхронного тягового привода шахтного електровоза

Схема електрична структурна керування ЕП ескалатора

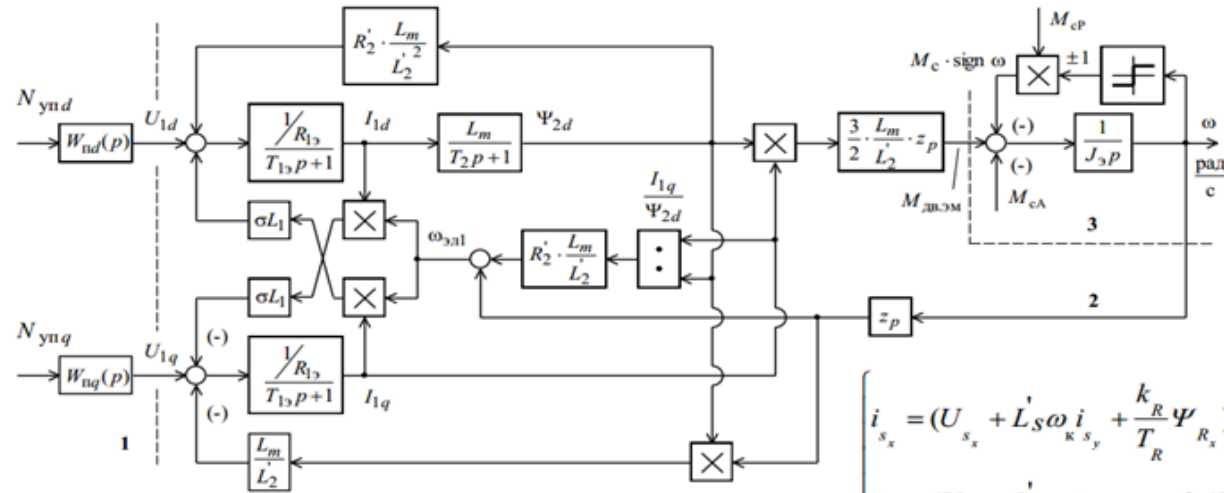


Рисунок 4.4 – Структурна схема силового каналу асинхронного електропривода із векторним керуванням та Рівняння, які описують динаміку змінних математичної моделі кожного двигуна

$$\begin{cases} i_{s_x} = (U_{s_x} + L_s' \omega_k i_{s_y} + \frac{k_R}{T_R} \Psi_{R_x}) \frac{1}{R(1 + T_s' p)}; \\ i_{s_y} = (U_{s_y} - L_s' \omega_k i_{s_x} - p_n \omega_k \Psi_{R_x}) \frac{1}{R(1 + T_s' p)}; \\ \Psi_{R_x} = \frac{T_s}{(1 + T_R p)} k_R R i_{s_x}; \\ M = \frac{3}{2} p_n k_R \Psi_{R_x} i_{s_y}; \\ \omega_k = p_n \omega + k_R R \frac{i_{s_y}}{\Psi_{R_x}}, \end{cases}$$

де U_{sx}, U_{sy} – складові напруги джерела струму по осям x та y ;

i_{sx}, i_{sy} – складові струму статора по осі x та y ;

ω_k – частота обертання рухомої системи координат xx та yy ;

ω – частота обертання ротора;

p_n – число пар полюсів;

Схема електрична принципова керування ЕП

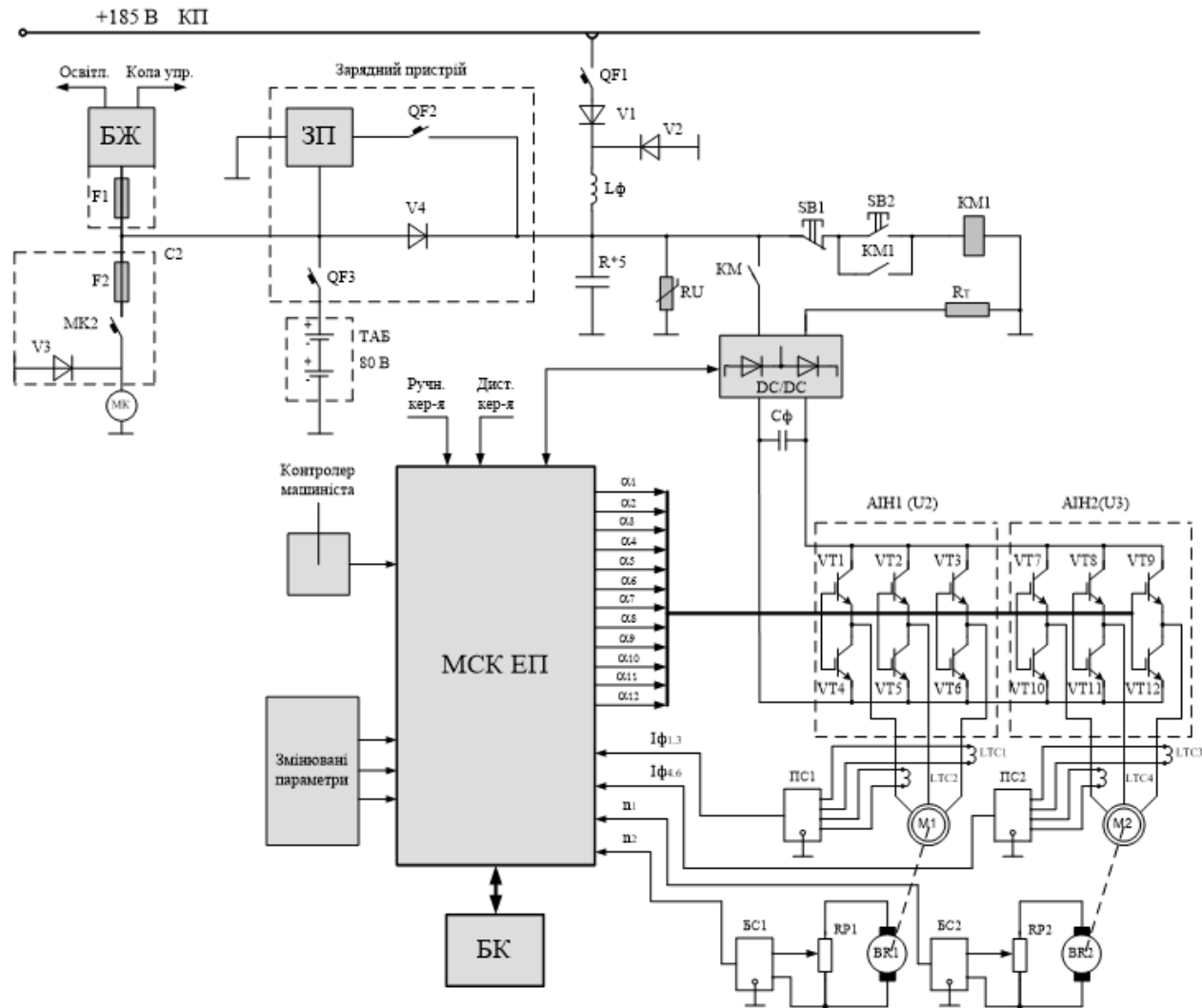


Рисунок 5.2 – Схема електрична принципова системи ЕП типу ПЧ

Дослідження динамічних характеристик СЕП

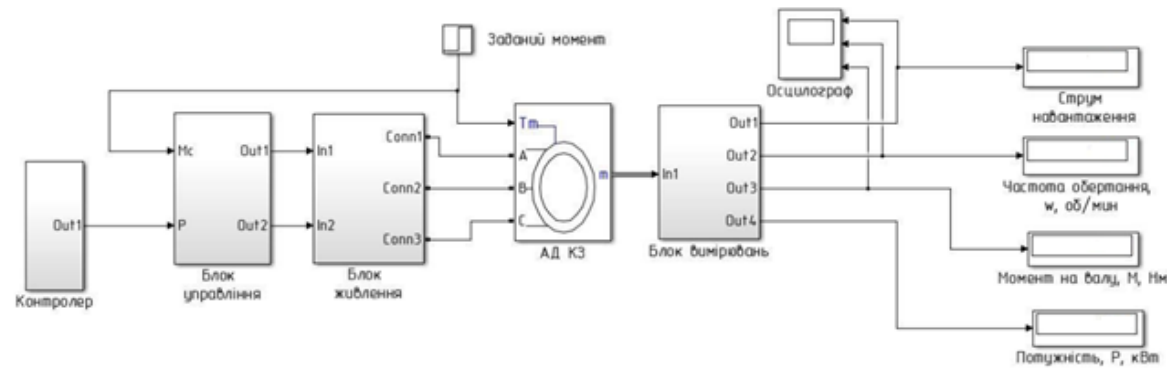


Рисунок 5.2 –
Модель системи ПЧ-АД
в ППП Matlab Simulink

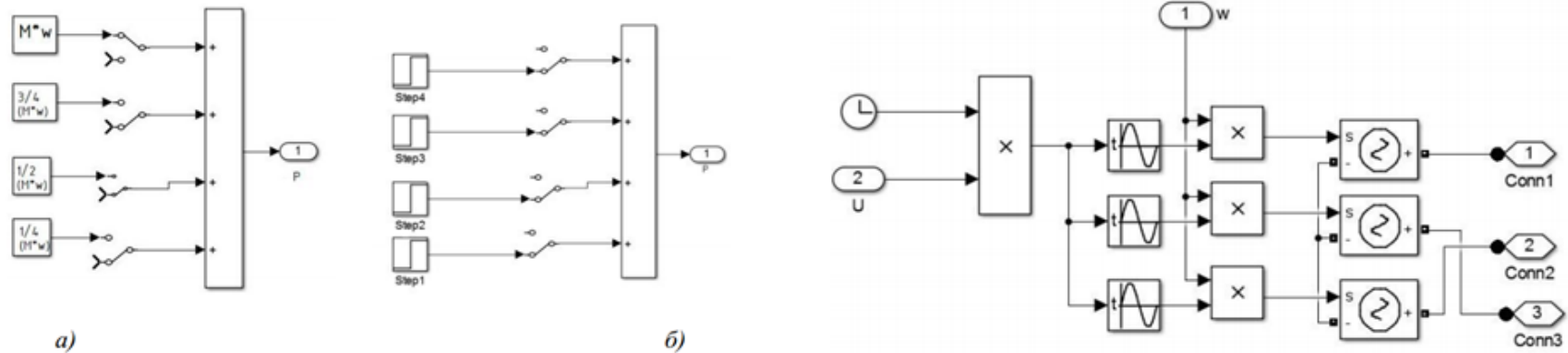
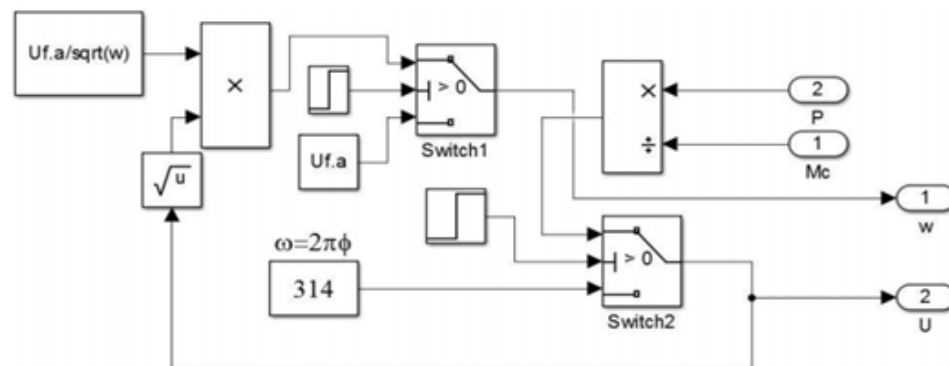


Рисунок 5.3 – Модель контролера
електровоза

Рисунок 5.5 – Модель блоку живлення

Рисунок 5.4 – Модель блоку керування



Дослідження динамічних характеристик СЕП ескалатора

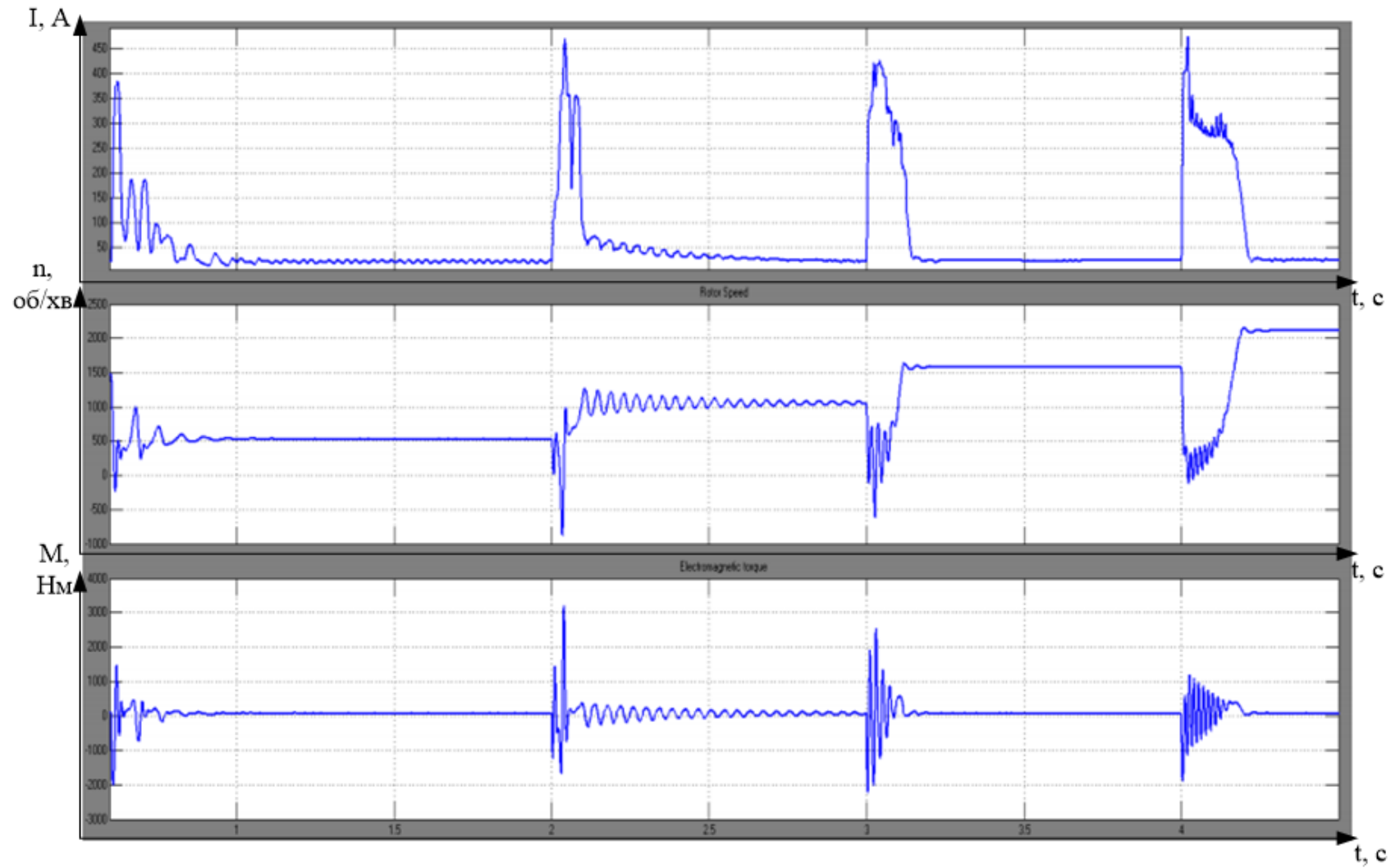


Рисунок 5.6 – Результати моделювання схеми в ППП Matlab Simulink

ВИСНОВКИ

Отримані такі результати дослідження:

1. Розглянуто загальні експлуатаційні та технічні характеристики об'єкта дослідження.
2. Проведені розрахунки для вибору потужності двигунів електровозу, виконані розрахунки та побудова навантажувальної діаграми досліджуваного електропривода. Розрахункова потужність приводного двигуна складає 34 кВт.
3. Проведені розрахунки економічної доцільності використання найбільш оптимального з технічної та економічної точки зору варіанту системи електропривода електровоза типу 7КА. Вибрано в якості системи ЕП систему ПЧ-АД.
4. Оцінено переваги контактно-акумуляторних електровозів із запропонованим асинхронним тяговим електромеханічним комплексом порівняно з традиційними контактними електровозами:
 - усунення контактного проводу в найбільш небезпечних ділянках (вантажні виробки) суттєво підвищує безпеку робіт;
 - ліквідовано витрати на спорудження та експлуатацію контактних мереж у навантажувальних виробках, які складають близько 30 % довжини загальної контактної мережі шахт;
 - використання частотно керованого асинхронного приводу дозволяє знизити витрати електроенергії на транспорті на 25–30 %;
 - витрати на ремонт і експлуатацію асинхронних тягових двигунів у 4–5 разів менші, ніж у двигунів постійного струму;
 - застосування безконтактного регулювання замість силових контролерів значно підвищує надійність системи керування;
 - збільшення маси електровоза та плавне регулювання дозволяють підвищити вантажопідйомність на 20–30 %;
 - дистанційне керування електровозом при вантажно-розвантажувальних роботах зменшує трудовитрати і підвищує продуктивність;
 - автоматизація процесів керування підвищує ефективність та спрощує роботу машиніста;
 - відсутність контактного дроту в зонах навантаження усуває небезпечні операції з струмознімачем, вилучення силового контролера підвищує безпеку роботи машиністів.

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Модернізація системи керування тягового електропривода шахтного електровоза

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕМСА-216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 12,6%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Гарант ОП Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Богачук В.В.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Топольницький П.В.

(прізвище, ініціали)

					08-24.БДР.021.00.000				
Зм	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Модернізація системи керування тягового електропривода шахтного електровоза	Літ.	Маса	Масштаб	
Розробив		Топольницький П.		20.05					
Перевірів		Богачук В.В.		20.05					
Т конр.									
Затверд.									
Затверд.		Мошноріз М.М.		20.06		Аркуш	Аркушів		
Норм.кон.		Паленко		03.06		ВНТУ, гр. ЕМСА-216			