

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 електропривода електровоза ДСЗ в режимах тяги та рекуперації»

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

Павло СЛОБОДЯН
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

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

« 11 » лютого 2025 р.

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

« 10 » лютого 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри

« 3 » серпня 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 МОШНОРІЗ

“ 18 ” листопада 2025 року

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

Слободяну Павлу Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модернізація системи керування електропривода електровоза ДСЗ в режимах тяги та рекуперації

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 2025року №97

2. Термін подання студентом роботи 03.06.2025р.

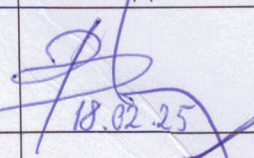
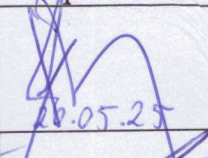
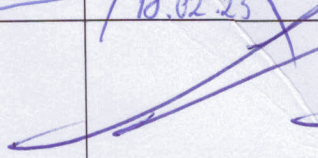
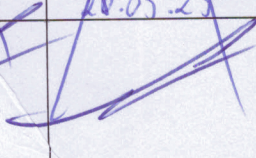
3. Вихідні дані до роботи: максимально можливий кут підйому локомотива – $\alpha = 0,5^\circ$; лобова площа парусності локомотива – $S = 6,4\text{м}^2$; маса локомотива – $m_{\text{л}}=184000$ кг; кількість вагонів складу – $n=30$; маса вагону – $m_{\text{в}}=21000$ кг; поворотний коефіцієнт (приймається для локомотива) – $\beta = 0,008$; передаточне число редуктора – $i=4,19$.

4. Зміст текстової частини: 1 Коротка характеристика виробничого механізму і режимів його роботи. 2 Розрахунок потужності привідного двигуна. 3 Техніко-економічне обґрунтування вибору системи електропривода. 4 Вибір електродвигуна. 5 Розробка системи електричної структурної системи електропривода та розрахунок і вибір елементів її силового кола. 6 Розробка схеми електричної принципової системи електропривода та вибір елементів кола керування. 7 Алгоритми та стійкість роботи в режимах тяги та рекуперації. Охорона праці. Висновки

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Загальна характеристика, будова, особливості електровоза. Розрахунок потужності двигуна, побудова тахограми механізму. Техніко-економічне обґрунтування вибору СЕП. Розробка схеми електричної структурної САЕП. Вибір елементів силового кола системи ЕП. Вибір засобів керування системою ЕП. Схема електрична принципова керування ЕП. Схема спряження систем керування ЕП

вагонів потягу. Алгоритми керування системою ЕП в режимах тяги та рекуперації.
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

18.02.25р

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)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська дипломна робота складається з 117 сторінки формату А4, на яких є 19 рисунків, 10 таблиць, список використаних джерел містить 21 найменування.

Виконано модернізацію системи керування електропривода електровоза ДСЗ. 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, режими тяги та рекуперації.

ABSTRACT

The bachelor's thesis consists of 117 pages of A4 format, on which there are 19 figures, 10 tables, the list of used sources contains 23 names.

The control system of the electric drive of the DS3 electric locomotive 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 the 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 the personnel performing maintenance and operation of the electric locomotive.

Keywords: electric drive, electric locomotive, regulation, microprocessor, electrical schematic diagram, modeling, traction and recuperation modes

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОВОЗА ТА РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ.....	8
1.1 Загальна характеристика об'єкту дослідження	8
1.2 Основні елементи тягового приводу електровоза	12
1.3 Технічні характеристики досліджуваного шахтного електровозу.....	12
1.4 Математична модель механічної частини електровозу.....	14
2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ПРИВІДНОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОВОЗА	18
2.1 Розрахунок та побудова навантажувальної діаграми і тахограми виконавчого органу виробничого механізму.....	18
2.2 Розрахунок необхідної потужності двигуна	23
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	25
3.1 Технічне обґрунтування вибору системи електропривода.....	25
3.2 Економічне обґрунтування вибору системи електропривода.....	27
4 МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОВОЗА ДСЗ.....	32
4.1 Вибір тягового електродвигуна	32
4.2 Характеристики електротяги змінного струму	33
4.3 Розробка схеми електричної структурної системи електропривода локомотива	36
4.4 Вибір силових елементів схеми електричної структурної системи електропривода електровоза.....	40
4.5 Розробка системи керування електропривода та вибір елементів кола керування	49
4.6 Розробка схеми принципової електричної системи електропривода..	58

5 АЛГОРИТМИ ТА СТІЙКІСТЬ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ В РЕЖИМАХ ТЯГИ ТА РЕКУПЕРАЦІЇ.....	63
5.1 Структура програмного забезпечення МСКЕ	63
5.2 Алгоритми автоматичного керування.....	63
5.3 Алгоритми регулювання в режимі тяги і рекуперації.....	67
5.4 Система рекуперації енергії електропотяга ДСЗ із використанням інерційних накопичувачів енергії.....	71
6 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	80
ВИСНОВКИ.....	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	96
Додаток А Технічне завдання.....	99
Додаток Б Ілюстративні матеріали.....	104
Додаток В Протокол перевірки кваліфікаційної роботи.....	117

ВСТУП

Актуальність теми. За час свого існування технічне оснащення електрифікованих залізниць зазнало значних змін, зберігши лише основний принцип функціонування. Сьогодні рухомий склад отримує енергію від тягових електродвигунів, які живляться електроенергією, виробленою на електростанціях. Електроенергія подається до залізничної мережі через високовольтні лінії, а далі — через контактну мережу безпосередньо до електровозів. Зворотним провідником виступають рейки та земля.

Сучасні електровози у режимах тяги й рекуперативного гальмування мають певні енергетичні недоліки, що не відповідають вимогам ефективної роботи. Основною проблемою є значне споживання реактивної потужності, а також спотворення синусоїдальної форми напруги й струму в первинному контурі трансформатора, що негативно впливає на коефіцієнт потужності. Крім того, використовувані алгоритми керування силовими перетворювачами створюють в контактній мережі істотні гармонічні спотворення.

Системи рекуперативного гальмування, якими оснащено електровози, дозволяють повернути частину енергії до мережі, що сприяє підвищенню пропускної здатності залізниці, безпеки руху та енергоефективності. Однак є низка факторів, які обмежують повноцінне застосування цієї технології. Зокрема, при переході інвертора в режим рекуперації відбувається істотне викривлення напруги в контактній мережі, а через вимушене завищення кута запасу інвертора знижується загальний коефіцієнт потужності.

Недостатньо високі коефіцієнти потужності та значні спотворення форми сигналу в мережі у режимах тяги і гальмування призводять до підвищених витрат електроенергії на перевезення. У зв'язку з цим, одним із перспективних напрямків модернізації електровозів є вдосконалення систем керування перетворювачами за рахунок введення діодних плечей, заміни традиційних тиристорів на новітні IGBT-транзистори та використання

сучасних алгоритмів керування, що дозволяє суттєво покращити енергетичні показники і зменшити рівень гармонік у контактній мережі.

Стосовно об'єкта дослідження — електровоза, варто зазначити, що його тяговий електропривод розрахований на приведення в рух не лише самого локомотива, але й усього складу поїзда, який може включати десятки вагонів. Система приводу є багатомоторною — у цьому випадку використовується вісім двигунів. При моделюванні такого приводу головним завданням є забезпечення узгодженої роботи всіх двигунів та рівномірного розподілу потужності між ними.

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

Предметом дослідження бакалаврської кваліфікаційної роботи є математичні моделі та структури, які дозволяють підвищити енергетичну ефективність тягового електропривода електровоза.

Методи дослідження. засновані на використанні методів теорії електричних машин, теорії управління, методів синтезу нелінійних систем управління, теорії та методів математичного моделювання, методів системних.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження в даній роботі є модернізація системи керування електровоза змінного струму в режимах тяги та рекуперативного гальмування.

Для досягнення цієї мети потрібно розв'язати наступні задачі:

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

2. Провести додаткові розрахунки для вибору потужності двигунів електровозу, виконати розрахунки та побудову навантажувальної діаграми досліджуваного електропривода.

3. Провести розрахунки економічної доцільності використання найбільш оптимального з технічної та економічної точки зору варіанту системи електропривода електровоза.

4. Вибрати найбільш оптимальний варіант системи керування електровоза типу ДСЗ з позиції використання в якості привідної системи на базі двигунів змінного струму та заміни існуючої релейної системи керування на сучасну мікропроцесорну систему. Це, з рештою, дасть змогу підвищити надійність, гнучкість налагодження та зменшити енергоспоживання системи електроприводу в цілому.

5. Розробити алгоритм управління транзисторним ВІП та тяговим електроприводом електровоза в цілому для режимів тяги та рекуперативного гальмування.

6. Провести моделювання запропонованої системи керування з метою перевірки адекватності поведінки системи реальним фізичним та електромеханічним процесам.

1 КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОВОЗА ТА РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ

1.1 Загальна характеристика об'єкту дослідження

Залізничний транспорт — це форма перевезень, при якій пасажирів та вантажі переміщуються спеціальними колісними транспортними засобами по рейкових шляхах [1]. Він є важливою складовою логістичних систем, що забезпечують підтримку міжнародної торгівлі та сприяють економічному розвитку. Залежно від типу силового агрегата, локомотиви поділяються на:

- паровози, що приводяться в рух паровими машинами;
- тепловози, в яких джерелом енергії є дизельний двигун із гідравлічною або електричною трансмісією;
- електровози, що працюють на електродвигунах;
- газотурбовози, де рушієм слугує газова турбіна з електричним приводом.

Електровози змінного струму серії ДСЗ (див. рисунок 1.1) належать до вантажних локомотивів, які використовуються на ділянках залізниці з електрифікацією змінного струму напругою 25 кіловольт і частотою 50 герц. У цих електровозах встановлено тягові електродвигуни змінного струму.

Конструкція електровоза передбачає наявність двох ідентичних секцій, кожна з яких має чотири осі й встановлена на візках. Кузови секцій виготовлені зварним способом із широким використанням гнутих профілів. На торцях кузовів розміщено автозчеплення типу СА-3, які обладнані фрикційними пристроями.

Каркас візків містить боковини коробчастої форми, зібрані з чотирьох металевих листів, литий брус шкворня та кінцеві елементи трубчастої будови. Буксові вузли з роликовими циліндричними підшипниками з'єднані з візковою рамою за допомогою поводків, що мають резинометалеві шарнірні з'єднання.

Передача тягових і гальмівних зусиль від візків до кузова здійснюється за допомогою шкворнів, які закріплені у рамі кузова. Шкворні проходять через кульові вкладиші, розміщені у шкворневих балках візків, що дозволяє візкам здійснювати поперечні зміщення відносно кузова. На ці кульові опори діє система повертальних пружин, яка забезпечує автоматичне вирівнювання і прагне звести до спільної лінії поздовжні осі кузова та візків.



Рисунок 1.1 – Електровоз змінного струму типу ДСЗ

Вертикальні та поперечні зусилля передаються від кузова до візків через систему підвіски, яка включає люлькові підвіски, а також горизонтальні й вертикальні упори. Конструктивно підвіски виконані у вигляді стрижнів: їхні нижні кінці через балансири та кронштейни підтримують кузов, тоді як верхні частини через пружинні елементи спираються на кронштейни, закріплені на рамі візка.

Допоміжна система, в якій використовуються електродвигуни пульсуючого струму, відзначається стабільною роботою навіть при зниженому рівні напруги, високим коефіцієнтом потужності та здатністю легко забезпечувати значні пускові моменти. Це дозволило застосовувати двигуни з невеликим резервом потужності. Завдяки такому типу електродвигунів стало можливим просто та ефективно здійснювати сезонне регулювання продуктивності вентиляторів за допомогою поетапної зміни напруги живлення.

Система допоміжного обладнання, що використовує електродвигуни пульсуючого струму, відзначається високою механічною стійкістю навіть при знижених рівнях напруги, значним коефіцієнтом потужності та здатністю легко розвивати великі пускові моменти. Це дозволило використовувати двигуни з відносно невеликим запасом потужності. Завдяки застосуванню таких електродвигунів стало можливим просто і ефективно здійснювати сезонне регулювання роботи вентиляторів через поетапне коригування напруги їх живлення.

Схема розташування обладнання на електровозі приведена на рисунку 1.2.

На рисунку 1.2: 1 – блок живлення склоочищувачів; 2 – пульт керування; 3 – руків'я пильності; 4 – прожектор; 5 – кондиціонер; 6 – шкаф апаратів №2; 7 – струмоприймач; 8 – охолоджувач; 9 – роз'єднувач струмоприймача; 10 – тяговий перетворювач; 11 – трансформатор напруги; 12 – дросель подавлення перешкод; 13 – головний вимикач; 14 – обмежувач перенапруги; 15 – перетворювач допоміжного обладнання; 16 – заземлювач; 17 – блок пневмоапаратів; 18 – моторедуктор склоочисника; 19 – підставка для ніг; 20 – розетка опалення потяга; 21 – тяговий трансформатор; 22 – акумуляторна батарея; 23 – прийомна катушка АЛСН; 24 – калорифер; 26 – кран допоміжного гальма; 27 – кран машиніста пр. № 395; 28 – блок керування системою пожежогасіння; 29 – панель стоянкового гальма; 30 –

мотор – компресор; 31 – мотор – вентилятор; 32 – шкаф для одягу; 33 – холодильник; 34 – кресло; 35 – допоміжний контролер; 36 – станція керування; 37 – панель керування; 38 – бак водонагрівача; 39 – санвузол; 40 – шкаф апаратів №1; 41 – розширювальний бак; 42 – трансформатор струму; 43 – блок керування БУ-ЕПТ; 44 – блок комутації комплексу приладів безпеки; 45 – електронний блок комплексу приладів безпеки; 46 – вогнегасник; 47 – пульт керування; 48 – блок живлення; 49 – фільтр.

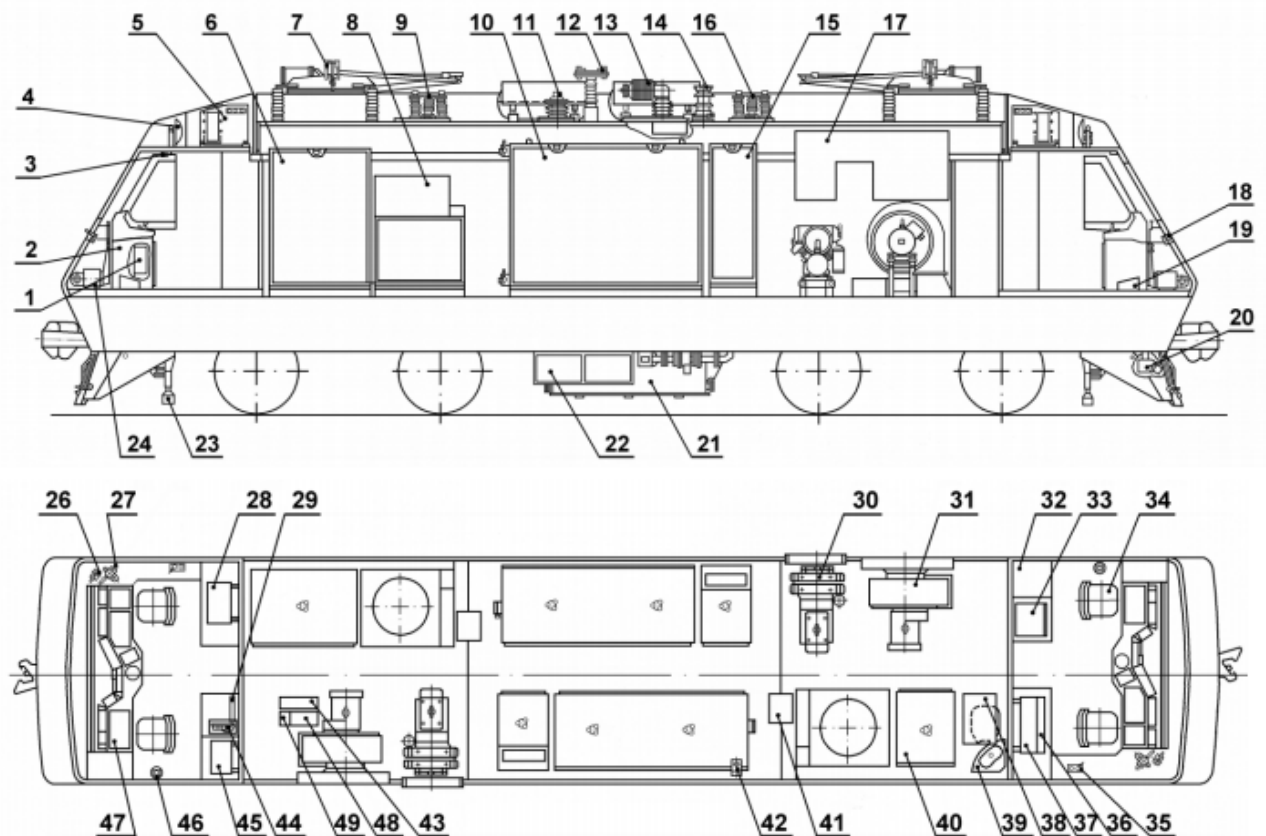


Рисунок 1.2 – Схема розташування обладнання на електровозі

Електровози серії ДСЗ призначені для експлуатації з вантажними та пасажирськими поїздами на магістральних залізничних лініях, які працюють на однофазному струмі промислової частоти з номінальною напругою 25 кВ на струмоприймачі. Усе обладнання цих електровозів спроектоване для стабільної роботи в межах допустимих коливань напруги контактної мережі згідно з ГОСТ 6962-54*, від 19 до 29 кВ, а також у широкому діапазоні

температур навколишнього середовища — від -50 до +40 °С за межами кузова.

Зовнішні розміри електровозів ДСЗ задовольняють вимогам габариту 1Т ГОСТ 9238-73.

Основні технічні характеристики електровоза ДСЗ приведені в таблиці 1.1.

Електровоз отримує електроенергію від контактної мережі через струмознімач, а зворотний ланцюг електричного кола замикається через колісні пари, які контактують із рейками. Передача руху від електродвигунів до коліс здійснюється за допомогою механічної трансмісії. За призначенням електровози поділяються на кар'єрні та тягові агрегати, маневрові локомотиви, що застосовуються для внутрішньозаводських перевезень та маневрової роботи на підземних залізничних шляхах великих промислових об'єктів, а також спеціальні та рудникові електровози.

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики електровоза ДСЗ

Показники	Значення
Марка	ДСЗ
Потужність на валах тягових двигунів, кВт	1200
Осьова формула	2о-2о
Сила тяги при рушанні з місця, кН	310 (31т.)
Сила тяги в тривалому режимі, кН	270 (27т.)
Швидкість в тривалому режимі, км / год	62,7
Ширина колії, мм	1520
Вид електричного гальмування	рекуперативне
Сила тяги при максимальній швидкості, кН, не менше:	
- з вантажним потягом (120 км/год)	140 (14т.)
- з пасажирським потягом (160 км/год)	100 (10т.)

1.2 Основні елементи тягового приводу електровоза

Електровоз складається з рами, приводу, ходової частини, ресор, а також гальмової й пісочної систем, зчіпних та буферних пристроїв.

Рама в акумуляторних локомотивах є жорсткою зварною конструкцією, тоді як у контактних локомотивах вона збирається з окремих елементів і виготовляється з поздовжніх та поперечних сталевих листів. У передній частині рами розміщується кабіна машиніста з керувальними органами: сидінням, контролером, пультом керування гальмами і пісковою системою, сигнальним дзвінком тощо. Посередині розташований привід, пристрої для заміни батарейного ящика та гальмівні механізми, а в задній частині — пускові опори.

Привід зазвичай складається з двох тягових електродвигунів постійного струму послідовного збудження і одно- або двоступінчастого редуктора з зубчастою передачею, який передає крутний момент колісним парам. У деяких моделях локомотивів застосовують гідропередачі, що забезпечують плавне регулювання швидкості руху, спрощують електрообладнання та зменшують втрати енергії. Привід є індивідуальним — кожна колісна пара приводиться в дію окремим двигуном.

Електричні машини мають властивість оборотності — здатність працювати як двигуни або генератори. На багатьох електровозах під час руху по спуску або перед зупинкою тягові двигуни переключаються в режим генератора. У цей час кінетична і потенційна енергія поїзда перетворюється в електричну і повертається в контактну мережу — цей процес називають рекуперацією електроенергії. Рекуперация використовується для електричного гальмування поїзда.

На електровозі ДСЗ електрична енергія, що виникає в режимі генератора, розсіюється у резисторах у вигляді тепла — цей метод гальмування називають реостатним. Для реалізації рекуперації на електровозах постійного струму встановлюють спеціальні двигун-генератори, які збуджують тягові двигуни, забезпечуючи їх стабільну роботу в генераторному режимі.

Електричне обладнання електровозів, що працює під високою

напругою, поділяється на два основні високовольтні кола — силове коло, яке включає тягові двигуни, а також пускову та регулюючу апаратуру, і ланцюг допоміжних машин із власним комплектом обладнання. Низьковольтні електричні пристрої, що керують апаратурою силового та допоміжного ланцюгів, об'єднані в окремий ланцюг управління.

Головним елементом управління є контролер машиніста, який разом з іншими низьковольтними пристроями розташований у кабіні машиніста.

Ходова частина складається з колісних пар (ходової осі з зубчатим колесом, колісних центрів і бандажів) та букс — з'єднувальних елементів між приводом і рамою. Рама, у свою чергу, зв'язана з буксами через листові або циліндричні пружини. Залежно від способу кріплення рами до ресор, підвішування буває індивідуальним або балансирним. При індивідуальному підвішуванні ресори опираються на раму обома кінцями і працюють незалежно одна від одної, а при балансирному — навантаження між колісними парами розподіляється за допомогою поперечних або поздовжніх балансирів.

Ресорна підвіска рами виконує функцію амортизації ударів і поштовхів, які виникають під час руху локомотива по стиках рейок, стрілочних переводах та нерівностях колії. Вона забезпечує більш рівномірний розподіл зчіпної ваги локомотива на колісні пари та створює комфортніші умови для роботи обслуговуючого персоналу.

Гальмівні системи локомотивів можуть бути трьох типів: колодкові (які можуть мати ручний, пневматичний або гідравлічний привід), електродинамічні (здійснюють гальмування за допомогою тягових двигунів) та рейкові електромагнітні гальма.

Тяговий привід електровоза (див. рисунок 1.3) включає редуктор, змонтований на колісній парі (рисунок 1.4), а також механізм передачі крутного моменту від тягового електродвигуна до редуктора.

Зчіпні та буферні пристрої забезпечують з'єднання локомотива з

вагонами, пом'якшуючи удари і захищаючи обладнання від пошкоджень. За конструктивними особливостями буфери поділяються на еластичні (які можуть бути підпружиненими або з гумовою прокладкою) та жорсткі (виготовлені з литих матеріалів, чавуну або сталі).

Електрообладнання включає тягові апарати, що відповідають за подачу живлення до двигунів — це струмознімачі, вимикачі, контролери, роз'єднувачі і пускові опори. Воно забезпечує можливість ввімкнення та вимкнення тягових машин, а також регулювання швидкості руху локомотива.

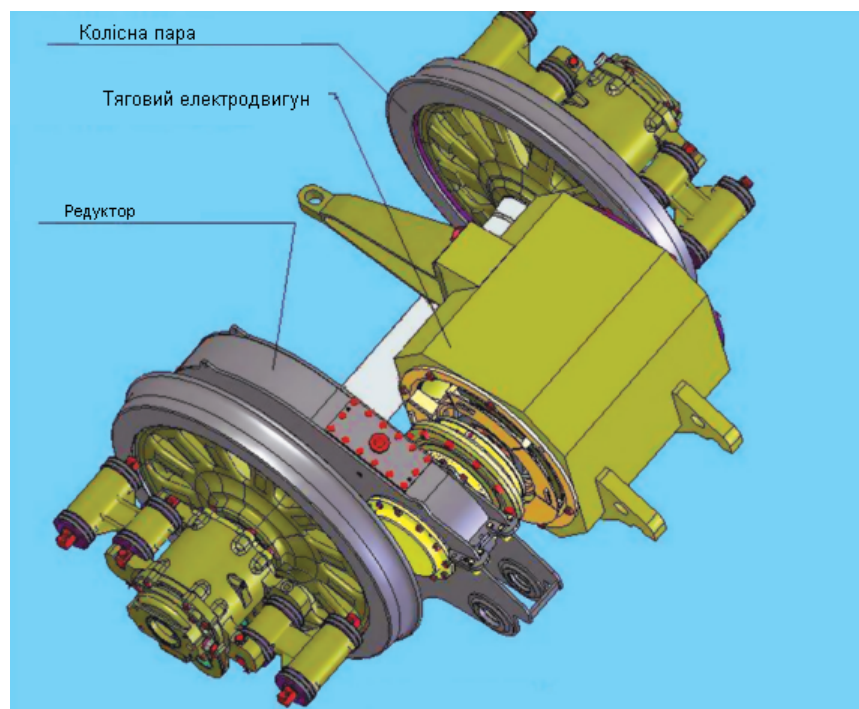


Рисунок 1.3 – Тяговий привод електровоза ДСЗ

Візки мають зварні рами. Букси забезпечені двома циліндричними однорядні роликowymi підшипниками, діаметр шийки колісної пари 180 мм.

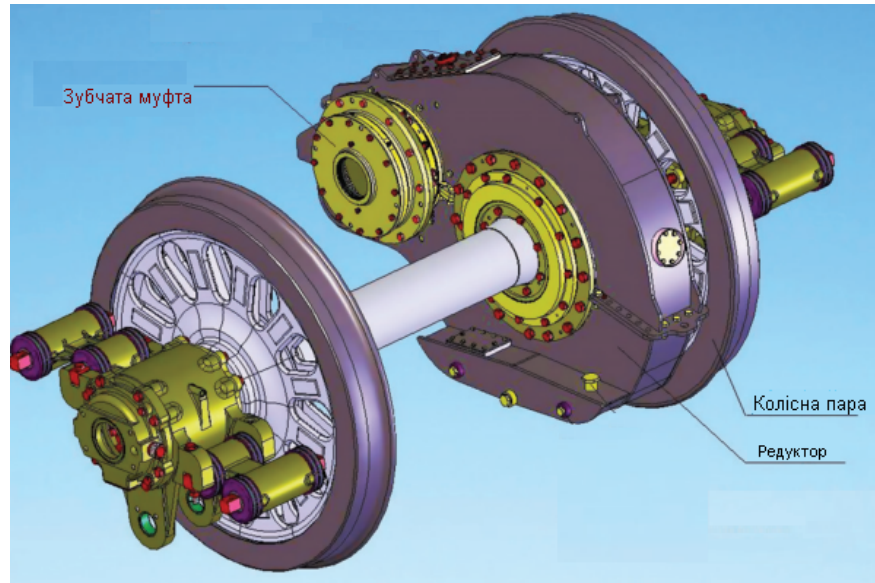


Рисунок 1.4 – Колісна пара електровоза ДС3

Букси у візках з'єднані з їх рамою за допомогою повідків і гумометалевих блоків, аналогічно електровозам ДС3. Підвіска ресор візків включає підбуксові балансири та циліндричні пружини; кожна вісь візка має індивідуальне підвішування, що потребує регулярного регулювання. Між підбуксовими балансирними елементами та рамою встановлені масляні амортизатори для демпфування коливань. Візки з'єднані між собою шарнірним зчленуванням у вигляді трикутників, які, у свою чергу, пов'язані пружною муфтою. Загальний статичний прогин ресорної підвіски становить 140 мм, при цьому приблизно 100 мм припадає на перший ступінь.

Кінематична схема тягового привода моторного вагона зображена на рисунку 1.5.

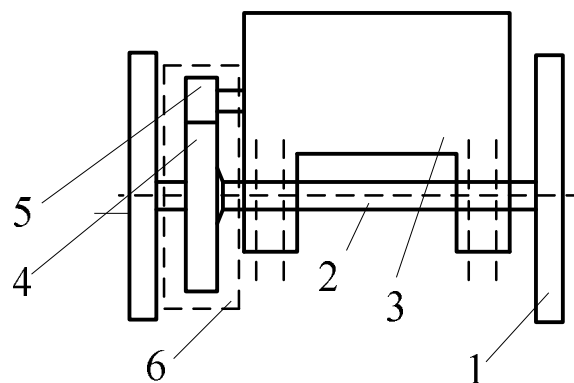


Рисунок 1.5 – Кінематична схема механізму

На рисунку 1.5 показано: 1 – приводне колесо; 2 – вісь колісної пари; 3 – тяговий електродвигун; 4 – ведена косозуба шестерня; 5 – ведуча шестерня тягового двигуна; 6 – редуктор колісної пари [3].

Обертальний момент від тягового електродвигуна передається через косозубу ведучу шестерню, яка закріплена на хвостовику валу двигуна, та ведену шестерню, що жорстко з'єднана з віссю колісної пари. Разом ці шестерні формують редуктор колісної пари.

Рух локомотива по рейковому полотні зображено на рисунку 1.6.

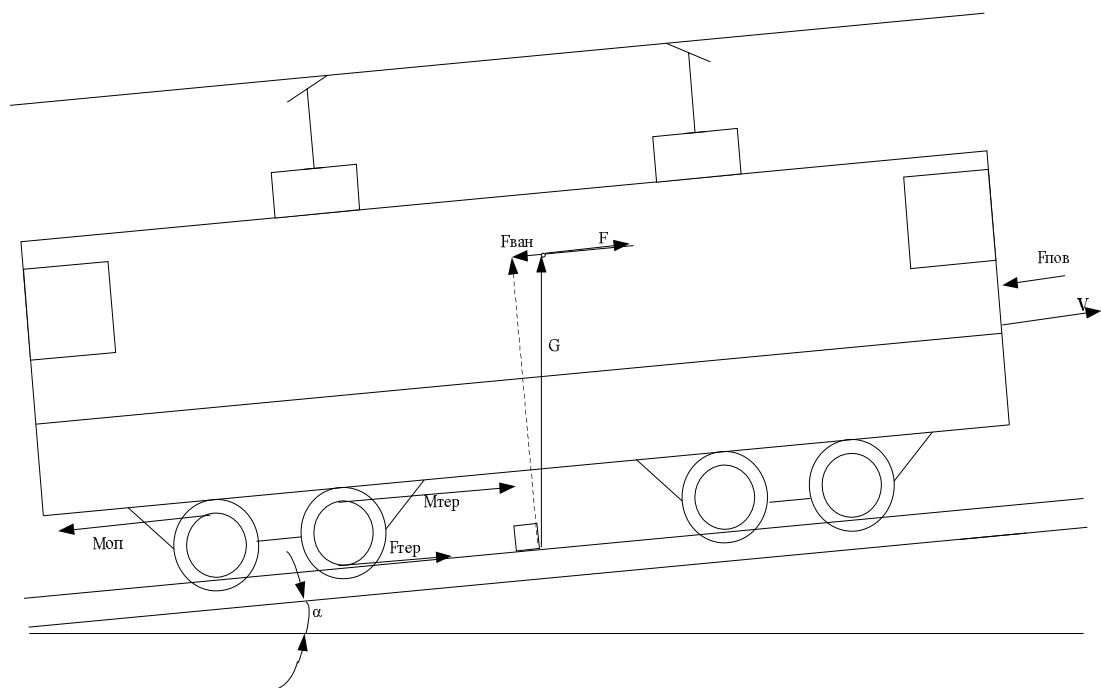


Рисунок 1.6 – Рух локомотива

Висновок: проаналізовано ключові технічні характеристики електровоза ДСЗ, який виступає як об'єкт дослідження. Цей електровоз оснащений кількома системами електроприводу, серед яких виділяють основні та допоміжні. В подальшому увага буде зосереджена на основній системі електроприводу локомотива ДСЗ, з урахуванням можливості її реалізації на базі двигунів змінного струму.

2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ПРИВІДНОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОВОЗА

2.1 Розрахунок та побудова навантажувальної діаграми і тахограми виконавчого органу виробничого механізму

Знайдемо силу опору що діє на локомотив при русі [3]:

$$F_{\text{оп}} = F_{\text{ван}} + F_{\text{тер}} + F_{\text{пов}} = (G_0 + G) \sin \alpha + k_{\text{тр}} (G_0 + G) \cos \alpha + C_{x0} V^2 S \rho / 2, \quad (2.1)$$

де G_0 —вагалокомотива;

G — вага вагонного складу;

$k_{\text{тр}}$ — коефіцієнт тертя;

α — максимально можливий кут підйому локомотива (приймається $0,5^\circ$);

C_{x0} — коефіцієнт опору повітря (для локомотива приймається 0,9);

V — швидкість локомотива;

S — лобова площа парусності локомотива [2], ($6,4 \text{ м}^2$);

ρ — середня густина повітря, ($1,22 \text{ кг/м}^3$);

Розраховуємо вагу локомотива:

$$G_0 = m_{\text{л}} \cdot g, \quad (2.2)$$

де $m_{\text{л}}$ — маса локомотива [2], ($m_{\text{л}}=184000 \text{ кг}$);

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

$$G_0 = 184 \cdot 10^3 \cdot 9.81 = 1805 (\text{кН}).$$

Розраховуємо вагу вагонного складу:

$$G = n \cdot m_{\text{в}} \cdot g, \quad (2.3)$$

де n — кількість вагонів складу (приймаємо $n=30$);

$m_{\text{в}}$ — маса вагону. Для розрахунку розглядаємо вантажний вагон моделі

12-1000 [4] ($m_B=21000$ кг);

$$G = 30 \cdot 21 \cdot 10^3 \cdot 9.81 = 6180(\text{кН}).$$

Розраховуємо коефіцієнт тертя:

$$k_{mp} = 2k_p \cdot \frac{(\mu \frac{d_j}{2} + f)}{d_k} + \beta, \quad (2.4)$$

де β – поворотний коефіцієнт (приймається для локомотива 0,008);

d_j – діаметр підшипника ходового колеса [2] ($d_j=0,15$ м);

d_k – діаметр ходового колеса [2] ($d_k=1,25$ м);

μ – коефіцієнт тертя ковзання [3] ($\mu=0,1$);

f – коефіцієнт тертя кочення [3] ($f=0,002$);

k_p – коефіцієнт, який враховує тертя реборд ходових коліс об рейки [3] ($k_p=1,3$).

$$k_{mp} = 2 \cdot 1,3 \cdot \frac{(0,1 \frac{0,15}{2} + 0,002)}{1,25} + 0,008 = 0,025,$$

$$F_{оп} = (1805 + 6180) \cdot 10^3 \cdot 0,0069 + 0,025 \cdot (1805 + 6180) \cdot 10^3 \cdot 0,999 + \frac{0,9 \cdot 44,67^2 \cdot 6,4 \cdot 1,22}{2} = 159,62(\text{кН})$$

Для визначення статичного моменту приведенного до валу тягового електричного двигуна скористаємося формулою:

$$M_{cm.max} = \frac{F_{on} \cdot R}{i \cdot \eta_{pe}}, \quad (2.5)$$

де i – передаточне число редуктора [2], ($i=4,19$);

$\eta_{ред}$ – коефіцієнт корисної дії редуктора [2], ($\eta = 0,93$).

Отже, знайдемо статичний момент двигуна з врахуванням руху на підйом (приведений до валу двигуна):

$$M_{ст. max} = \frac{159,62 \cdot 0,625}{4,19 \cdot 0,93} = 25,64 \text{ (кН м)}$$

Динамічну складову визначимо з умови, що [5]:

$$M_{дин. max} = J_{max} \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.6)$$

де J_{max} – загальний момент інерції, приведений до валу двигуна ;

$\frac{d\omega}{dt}$ – кутове прискорення локомотива при розгоні.

Загальний момент інерції, приведений до валу двигуна [5]:

$$J_{max} = J_{dv} + \frac{J_g}{i_g^2} + \frac{J_k}{i_g^2 \cdot i_k^2} + m_{max} \frac{v^2}{\omega_{dv}^2}, \quad (2.7)$$

де J_{dv} – момент інерції двигуна;

J_g – момент інерції обертових частин головної передачі;

J_k – момент інерції коліс;

i_g – передаточне число головної передачі;

i_k – передаточне число колісної передачі;

ω_{dv} – кутова швидкість тягового двигуна;

v – швидкість руху локомотива.

Проаналізувавши формулу (2.7), можна зробити висновок, що момент інерції, який виникає через поступальний рух локомотива, значно перевищує момент інерції, створений обертовими компонентами. Тому на цьому етапі вплив моментів інерції обертових частин можна вважати незначним і врахувати їхній ефект через коефіцієнт запасу. В результаті формула для визначення моменту інерції, приведенного до валу двигуна, набуває

спрощеного вигляду:

$$J_{\max} = m_{\max} \frac{v^2}{\omega_{dv}^2}, \quad (2.8)$$

$$m_{\max} = m_{\text{л}} + n \cdot m_{\text{в}}, \quad (2.9)$$

$$m_{\max} = 184 + 30 \cdot 21 = 814 (\text{т}).$$

Кутова швидкість обертання тягового двигуна під час руху локомотива з номінальною швидкістю становить $v = 44,67$ м/с, використовуючи загальне передаточне число i та радіус коліс R :

$$\omega_{dv} = i \cdot \omega_k = i \frac{v}{R}, \quad (2.10)$$

$$\omega_{dv} = 4,19 \cdot \frac{44,76}{0,625} = 299,46 \text{ (рад/с)},$$

Отже, момент інерції приведений до валу двигуна:

$$J_{\max} = 814 \cdot \frac{44,67^2}{115,47^2} = 121,8 \text{ (т} \cdot \text{м}^2\text{)},$$

Знайдемо кутове прискорення тягового електричного двигуна для розгону локомотива:

$$\left(\frac{d\omega}{dt} \right)_p = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_{dv}}{t_p}, \quad (2.11)$$

де t_p – час розгону до даної швидкості,

$$\left(\frac{d\omega}{dt} \right)_p = \frac{115,47}{122,44} = 0,94 (\text{с}^{-2}),$$

Динамічний момент для розгону, при граничній місткості:

$$M_{\text{дин.мах}} = J_{\text{мах}} \cdot \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_p, \quad (2.12)$$

$$M_{\text{дин.мах}} = 11,34 \cdot 10^3 \cdot 0,94 = 10,69 \text{ (кН} \cdot \text{м)}$$

Максимальний момент за яким будемо вибирати тяговий електричний двигун визначимо з формули:

$$M_{\text{дв.мах}} = k_3 \cdot (M_{\text{ст.мах}} + M_{\text{д.мах}}), \quad (2.13)$$

де k_3 — коефіцієнт запасу приймаємо ($k_3=1,1$);

$$M_{\text{дв.мах}} = 1,1 \dots 1,3 \cdot (25,64 + 10,69) = 39,96 \dots 47,23 \text{ (кН} \cdot \text{м)}$$

Побудуємо навантажувальну діаграму. Тахограма швидкості та діаграма навантажень електропривода локомотива приведена на рисунку 2.1.

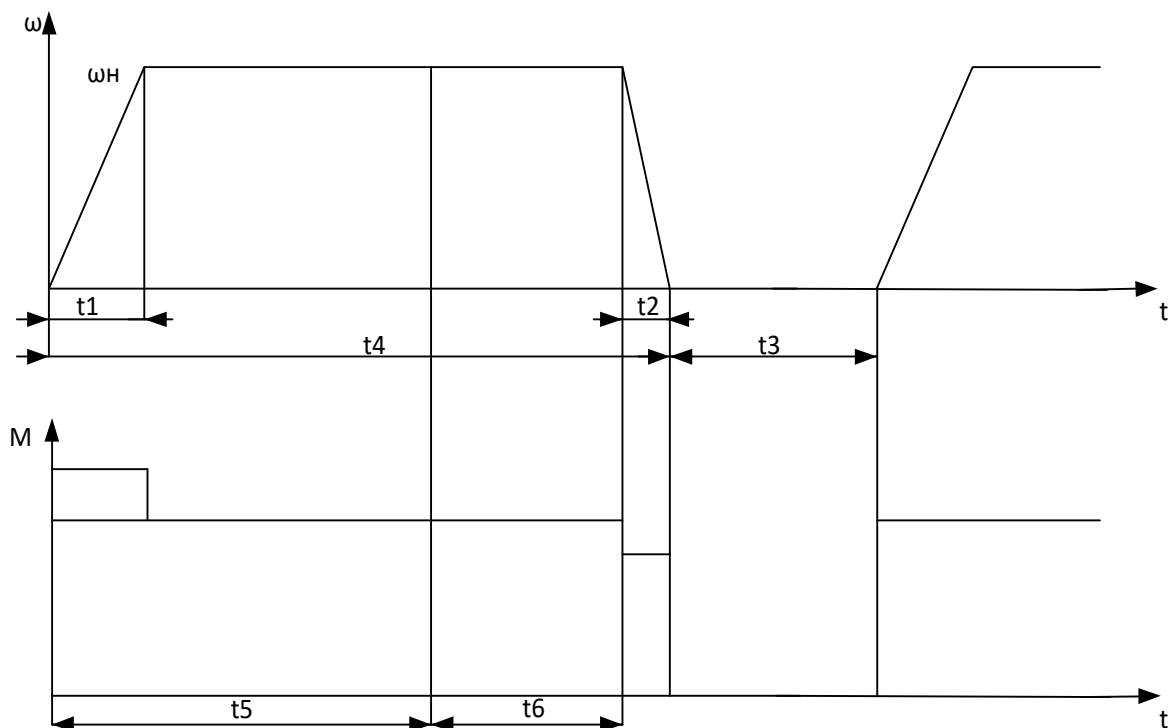


Рисунок 2.1— Тахограма швидкості та діаграма навантаження

а) тахограма швидкості

б) діаграма навантаження

На рисунку 2.1 прийнято такі позначення:

t_1 – час розгону локомотива, приблизно становить 70 с;

t_2 – час гальмування, приблизно становить 35 с;

t_3 – час простою локомотива на зупинках, приймаємо 120 с;

t_4 – загальний час руху локомотива між зупинками, приймаємо 600 с;

t_5 – час роботи тягового електричного двигуна, 495 с;

t_6 – час, при якому локомотив рухається за рахунок сил інерції (з відключенням від мережі двигуном), 120с.

2.5 Розрахунок необхідної потужності двигуна

На основі отриманих вище даних, а саме максимального моменту та швидкості обертання двигуна, знаходимо необхідну потужність системи двигунів.

$$P_c = M_{\text{дв max}} \cdot \omega_{\text{дв}}, \quad (2.14)$$

$$P_{c1,1} = 39,96 \cdot 115,47 = 4614,17(\text{кВт})$$

$$P_{c1,1} = 47,23 \cdot 115,47 = 5453,64(\text{кВт})$$

Варто також врахувати, що приводна система локомотива включає вісім двигунів, які сумарно забезпечують потрібну потужність. Тому для визначення потужності одного двигуна необхідно розподілити загальну потужність системи на кількість двигунів.

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_c}{n_{\text{дв}}}, \quad (2.15)$$

де $n_{\text{дв}}$ – кількість двигунів у локомотиві ($n=8$);

$$P_c = \frac{4800}{4} = 1200 (\text{кВт}).$$

Висновок: В результаті виконаних розрахунків визначено максимальний необхідний момент двигуна, побудовано тахограму швидкості та діаграму навантаження, а також попередньо оцінено необхідну потужність привідного двигуна електровоза, яка становить 1200 кВт.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Технічне обґрунтування вибору системи електропривода

Для оптимального вибору системи електроприводу необхідно об'єктивно оцінити доступні на ринку варіанти регульованих приводів, які відповідають технічним вимогам конкретного застосування. Основні критерії оцінки включають:

Загальна вартість придбання регульованого приводу та необхідного додаткового обладнання.

Поточні експлуатаційні витрати, зокрема:

- вартість обслуговування;
- виробничі витрати, коефіцієнт корисної дії (ККД) та ін.;
- площа, необхідна для розміщення системи.

Технологічні та інноваційні характеристики:

- динамічні показники, час розгону, можливість роботи у 4-х квадрантах, аварійне гальмування тощо;
- масо-габаритні параметри.

Надійність і експлуатаційна придатність приводів:

- відповідність міжнародним стандартам (IEC, ГОСТ Р, EN, CE-EMC, CSA, UL тощо);
- умови експлуатації, ступінь захисту корпусу, можливість ремонту на місці.

Екологічний вплив.

Вимоги до простору для розміщення перетворювача і двигуна.

Система відведення тепла.

Зі збільшенням обсягів перевезень та потужності електровозів зростають тягові струми, що призводить до більших втрат напруги і електроенергії у контактній мережі. Особливо це актуально на ділянках

залізниць, електрифікованих постійним струмом з напругою 3000 В, де виникають обмеження в русі поїздів. Для їх усунення збільшують площу перетину контактної підвіски та кількість підстанцій, що значно підвищує витрати і споживання дефіцитних матеріалів, таких як мідь.

Тягові двигуни електровоза мають відповідати, як мінімум, двом вимогам: можливість широкого регулювання частоти обертання для зміни швидкості руху та регулювання тягового моменту, щоб забезпечувати велику силу тяги при русанні, розгоні, підйомах і зменшувати її за менш складних умов руху.

Враховуючи великі моменти інерції локомотивів, особливе значення набуває застосування економічного електроприводу з можливістю рекуперації енергії в мережу під час гальмування.

Для регульованого електроприводу електровозів, на відміну від традиційних систем постійного струму, може використовуватись електропривод змінного струму на базі частотного перетворювача та асинхронного двигуна або привід з вентильним двигуном. За техніко-економічними і експлуатаційними характеристиками такі системи мають суттєві переваги.

На сьогодні частотне регулювання швидкості обертання двигунів змінного струму стало промисловим стандартом. Це стало можливим завдяки розвитку сучасних частотних перетворювачів, що забезпечують найекономічніші алгоритми управління двигуном, адаптовані до конкретних технологічних процесів. Використання таких приводів дозволяє заощаджувати від 20 до 50 % електроенергії порівняно з приводами без частотного регулювання.

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);
- тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун (ТРН-АД);
- 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 ($E_0 = 0,015$).

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

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 зарік.

Час роботи механізму за рік:

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

де d – кількість робочих днів ($d = 221$);

z – кількість змін ($z = 2$);

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

$$T_p = 221 \cdot 2 \cdot 8 = 2842 \text{ (год)}.$$

Відповідно постанови Кабінету Міністрів України від 15.08.2005 № 745 «О переходе к единым тарифам на электрическую энергию, отпускаемую потребителям» та постанові НКРЕКУ від 26.03.2015р. №947 із врахуванням граничних рівнів при поступовому формуванні єдиних роздрібних тарифів для споживачів на території України в травні 2016 р. вартість електроенергії для електрифікованого залізничного транспорту другого класу напруги (нижче 27,5 кВ) включно із ПДВ складає 2,016 грн/кВт год.

Втрати потужності:

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

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

η_d – ККД двигуна ($\eta_d = 0,82$).

Термін окупності:

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

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

Таблиця 3.1 – Економічне порівняння варіантів систем електропривода

Показники	Тип системи електроприводу			
	ТП-ДПС	ШП-ДПС	РК-ДПС	ПЧ-АД
Потужність двигуна P_n , кВт	1200			
Вартість двигуна (Д), грн.	1307025	1307025	1307025	950486
Вартість системи керування (СК), грн.	1181821	1241337	1381337	890320
Капіталовкладення $K = Д + СК$, грн	2488846	2548362	2688362	1840806
E_a	0,05			
Амортизаційні відрахування, $С_a = E_a * K$, грн.	124442	127418	134418	92040
E_o	0,015			
Витрати на обслуговування і ремонт, $С_o = E_o * K$, грн.	37333	38225	40325	27612
Вартість електроенергії то, грн/кВт год	10,93			
Коефіцієнт завантаження k_z	0,7			
Річний час роботи T_p , год	2842			
Кількість втраченої електроенергії за рік, кВт	284321	275544	325544	265253
Витрати на електроенергію, грн	3107629	3011696	3558196	2899215
Собівартість $С = С_a + С_o + С_{\Delta W}$, грн.	3269404	3177339	3732939	3018868
Нормативний коефіцієнт економічної ефективності E_n	0,15			
Зведені витрати $З = E_n * K + С$, грн.	3642730	3559593	4136193	3294988

При вартості двигуна $Д = 950486$ грн. та системи керування $СК = 550231$ грн. капіталовкладення становитимуть:

$$K = Д + СК, \quad (3.10)$$

$$K = 950486 + 890320 = 1840806 \text{ (грн.)}.$$

Амортизаційні витрати відповідно:

$$C_a = 0,05 \cdot 1840806 = 92040 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на обслуговування і ремонт:

$$C_o = 0,015 \cdot 1840806 = 27612 \text{ (грн.)}.$$

Втрати потужності відповідно до (3.8):

$$\Delta P = 0,7 \cdot 1200 \cdot (1 - 0,9) / 0,9 = 118,4 \text{ (кВт)}.$$

Кількість втраченої електроенергії за рік відповідно до (3.6):

$$\Delta W = 118,4 \cdot 2842 = 265253 \text{ (кВт·год)}.$$

Витрати на електроенергію відповідно до (3.5):

$$C_{\Delta W} = 10,93 \cdot 265253 = 2899215 \text{ (грн.)}.$$

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

$$C = 2899215 + 27612 + 92040 = 3018868 \text{ (грн.)}.$$

Зведені витрати відповідно до (3.1):

$$Z = 0,15 \cdot 1840806 + 3018868 = 3294988,6 \text{ (грн.)}.$$

Аналогічним чином розраховуються економічні показники і для інших систем.

Висновок: Аналізуючи дані таблиці 3.1, можна зробити висновок, що з точки зору економічних показників найбільш вигідними є системи електроприводу змінного струму. Лідером є система ПЧ-АД. Щодо енергозбереження, надійності роботи та динамічних характеристик також перевагу має система ПЧ-АД.

Оскільки одним із ключових критеріїв вибору системи електроприводу в нашому випадку є рівень споживаної електроенергії, оптимальним вибором є система ПЧ-АД. Застосування плавного частотного пуску забезпечує:

- обмеження пускових струмів двигуна і виключення значних коливань механічного моменту при пуску безпосередньо від мережі, що підвищує ресурс двигуна і механічної частини;
- зниження теплових ударних навантажень при пуску;
- запобігання підвищеним електродинамічним зусиллям в обмотках, які можуть спричинити руйнування ізоляції;
- виключення великих пускових струмів у мережі, що особливо важливо для районів із обмеженою потужністю електроенергетичних систем.

Враховуючи результати техніко-економічного порівняння та відповідність вимогам до системи електроприводу, вибір зупинено на системі керування ПЧ-АД. Хоча її встановлення не є найдешевшим варіантом, ця система відзначається високою економічністю та кращим відповідністю технічним критеріям.

4 МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОВОЗА ДСЗ

4.1 Вибір тягового електродвигуна

У промислових умовах найширше застосування отримали два основні типи електродвигунів: асинхронні трифазні двигуни змінного струму та колекторні двигуни постійного струму з різними схемами збудження.

Беручи до уваги задану частоту обертання, а також розраховану потребу в потужності, і зважаючи на економічну доцільність, оптимальним вибором є електродвигун пульсуючого струму з послідовним збудженням — модель СТА-1200. Його технічні характеристики наведені у таблиці 4.1 [2].

Таблиця 4.1 – Паспортні дані двигуна

Тип двигуна	СТА-1200
Номінальна потужність P_H , кВт	1200
Режим роботи	тривалий
Обертаючий момент M , Н м	9400
Частота напруги живлення F , Гц	55,9
Кількість полюсів $2P$	6
Ном./макс. частота обертання n_H , об/хв	950/2900
Номінальна напруга живлення U_H , В	1870
Номінальний струм I_H , А	450
Номінальний к.к.д. %	95,5
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$	0,88
Клас ізоляції	Н
Маса двигуна без зубчатої передачі, кг	2410

Асинхронний тяговий електродвигун призначений для вантажопасажирського електровоза змінного струму із частотною системою керування. Загальний вигляд тягового асинхронного двигуна електровоза ДСЗ типу СТА-1200 показаний на рисунку 4.1.

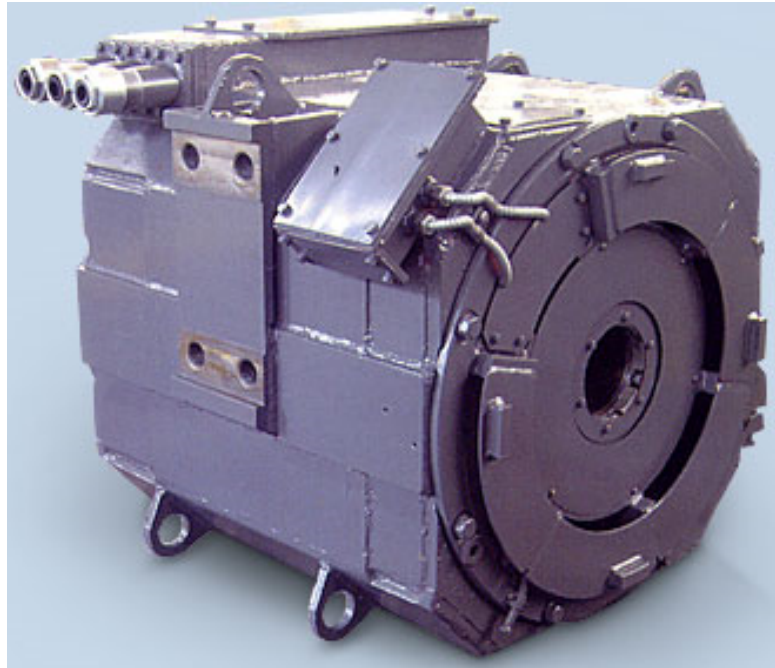


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд тягового двигуна СТА-1200

4.2 Характеристики електротяги змінного струму

Запровадження статичних перетворювачів частоти істотно розширило можливості використання асинхронних електродвигунів. Це дозволило досягти високих швидкостей обертання, які раніше були недоступними для електродвигунів постійного струму, при цьому зберігаючи можливість ефективного й гнучкого регулювання частоти обертання.

У частотно-регульованих приводах на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором застосовують два основних методи керування: скалярне і векторне. Скалярне керування ґрунтується на регулюванні частоти живлення та амплітуди напруги, струму або магнітного потоку двигуна. Це може реалізовуватись як частотне (регулювання f_1 та U_1), так і частотно-струмове керування (регулювання f_1 та I_1).

При зміні частоти живлення двигуна без відповідної корекції амплітуди напруги відбуваються відхилення ключових параметрів: пускового та максимального моментів, коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності.

Тому, щоб зберегти стабільність характеристик двигуна, зі зміною частоти f необхідно одночасно пропорційно змінювати напругу U , зберігаючи співвідношення $U/f = \text{const}$ (для постійного моменту навантаження). Для вентиляторних навантажень зазвичай застосовується залежність $U/f^2 = \text{const}$.

Скалярне керування є найпоширенішим способом регулювання асинхронних приводів завдяки простоті реалізації та мінімальним вимогам до вимірювання електричних величин. Водночас, його основним недоліком є обмежена точність регулювання швидкості та моменту у динамічних режимах, що обумовлено складністю фізичних процесів у двигуні. Тим не менш, скалярне керування ефективно функціонує у більшості практичних застосувань з діапазоном зміни частоти обертання до 1:40.

Векторне керування асинхронним електроприводом дозволяє значно розширити діапазон регулювання, забезпечити високу точність керування та покращити динамічні характеристики приводу. На відміну від скалярного керування, векторне передбачає не лише зміну частоти та амплітудних значень електричних величин двигуна, а й урахування взаємного просторового розташування їх векторів у полярній або декартовій системі координат.

Завдяки незалежному регулюванню амплітуд і фазових співвідношень між векторами струмів, напруг і потокозчеплення досягається повноцінне керування асинхронним двигуном як у статичних, так і в динамічних режимах. Це забезпечує суттєве покращення перехідних процесів у порівнянні зі скалярним керуванням, що часто і є головним критерієм вибору векторного методу керування.

Інформацію про миттєві значення та просторову орієнтацію векторів електромагнітних змінних можна отримувати або безпосереднім шляхом — через датчики струму, напруги та положення ротора, або непрямим методом — на основі математичного моделювання параметрів асинхронного двигуна. Конкретна структура й складність математичної моделі залежить від вимог до

точності та швидкодії системи керування.

Варто зазначити, що непрямі системи векторного керування поступаються прямим за точністю в умовах нестабільності параметрів двигуна. Проте вони виграють у практичній реалізації, оскільки менш вимогливі до апаратного забезпечення і більш прості в реалізації, що позитивно позначається на їхній надійності та собівартості.

Приклад реалізації наведено на рисунку 5.1, де представлена функціональна схема низьковольтного перетворювача частоти. На вхід системи подається змінна напруга живлення з постійною амплітудою та частотою ($u_{вх} = \text{const}$, $f_{вх} = \text{const}$), яка надходить на керований випрямляч (поз. 1). Для згладжування пульсацій випрямленої напруги ($u_{випр}$) застосовується фільтр (поз. 2), що разом з випрямлячем формує ланку постійного струму. З виходу фільтра постійна напруга (u_d) подається на автономний інвертор (поз. 3), який забезпечує формування напруги з необхідною частотою та амплітудою для живлення асинхронного двигуна.

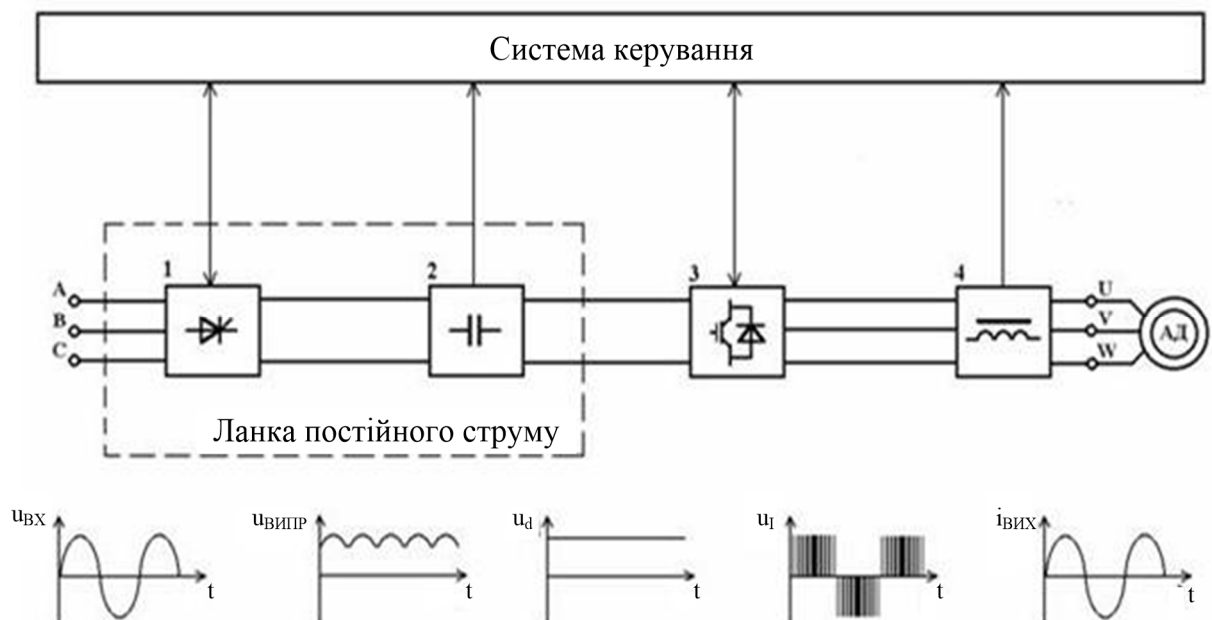


Рисунок 4.2 – Функціональна схема перетворення сигналів в ПЧ

Автономний інвертор реалізується на базі силових напівпровідникових ключів, зокрема тиристорів або біполярних транзисторів із ізольованим затвором (IGBT). Вибір елементної бази залежить від вимог до частоти перемикання, надійності та потужності приводу. Для покращення якості вихідного струму та зниження високочастотних гармонік, що виникають у процесі комутації, на виході інвертора може бути встановлений фільтр (поз. 4). Він виконує функцію згладжування пульсацій струму, забезпечуючи більш стабільне живлення тягового двигуна.

4.3 Розробка схеми електричної структурної системи електропривода локомотива

Однією з ключових характеристик електровоза є його тягова характеристика, яка визначає залежність між тяговим зусиллям і швидкістю руху. Асинхронні двигуни вирізняються жорсткою природною механічною характеристикою, що є перевагою для тягового електропривода, оскільки забезпечує стабільну реалізацію тягового зусилля [3]. За умови правильного розташування цієї характеристики в допустимій області тягових режимів, її можна використовувати як основу для формування тягової характеристики локомотива.

Розглянемо питання реалізації тягової характеристики на базі асинхронного електропривода, зокрема два важливі аспекти:

- оптимальна структура силової схеми електровоза;
- побудова системи керування.

Одним із ключових рішень при проєктуванні перетворювальної установки є вибір між використанням індивідуальних частотних перетворювачів для кожного тягового двигуна або одного спільного для всіх. В особливостях асинхронного привода криється те, що при паралельному живленні декількох двигунів від одного перетворювача і наявності навіть

незначних відмінностей у характеристиках (наприклад, внаслідок різного зносу колісних пар), виникає суттєва нерівномірність навантаження, що є неприпустимою. Це зумовлює необхідність або використання окремих перетворювачів на кожен двигун, або впровадження спеціальних заходів з балансування навантажень у системах з одним спільним перетворювачем.

Асинхронні двигуни з частотним регулюванням дозволяють формувати набір механічних характеристик, розташованих як вище, так і нижче природної. Водночас слід враховувати, що номінальний обертовий момент може бути досягнутий лише при частотах, нижчих за номінальну. При роботі на частотах вище номінальної реалізується режим регулювання з постійною потужністю, що обмежує можливість подальшого зростання моменту.

Найбільш перспективним з погляду енергетичної ефективності та експлуатаційної надійності є застосування індивідуальних інверторів для живлення кожного тягового двигуна. Такий підхід дозволяє не лише зменшити нерівномірність навантаження між двигунами, але й забезпечити розподіл втрат у силовій електроніці між окремими перетворювачами, що істотно спрощує задачу тепловідведення та підвищує довговічність апаратури.

На рисунку 4.3 наведено спрощену структурну схему силової частини асинхронного тягового електропривода, в якій реалізовано індивідуальне керування двома тяговими двигунами. Схема включає перетворювач постійної напруги U_1 , два автономні інвертори U_2 та U_3 , а також джерело живлення змінного струму. Така структура дозволяє досягти високої ступені незалежності в управлінні кожним двигуном, знижуючи вимоги до симетрії їхніх навантажувальних режимів.

Оскільки для формування тягової характеристики необхідна висока жорсткість, а допустима область її реалізації в основному обмежується умовами електродинамічного або рекуперативного гальмування, система керування частотою обертання може бути реалізована у спрощеному вигляді.

У цьому випадку вхідним сигналом є завдання бажаної швидкості руху, яке більшість часу безпосередньо передається на вхід регулятора частоти інверторів. Основна функція системи керування полягає у введенні обмежень на вихідну частоту інверторів залежно від поточного навантаження, температури силових елементів або граничних значень електричних параметрів двигуна.

До основних обмежень, які накладаються в системі керування частотою інвертора в асинхронному тяговому електроприводі, належать:

- Обмеження максимальної швидкості обертання відповідно до заданої тягової характеристики, що забезпечує рух в межах допустимих механічних і електричних навантажень на тягове обладнання.

- Обмеження частоти інвертора відповідно до стану мережі живлення, зокрема при зниженні напруги або інших аварійних ситуаціях, що можуть впливати на стабільність роботи електроприводу.

- Обмеження частоти для забезпечення роботи двигуна в межах стійкої ділянки механічної характеристики, тобто до настання критичного ковзання, за якого знижується здатність двигуна розвивати необхідний момент.

Реалізація таких обмежень потребує гнучкої системи логічного аналізу та обробки сигналів, тому доцільно використовувати мікропроцесорну техніку. Сучасні мікроконтролери та цифрові сигнальні процесори (DSP) дозволяють ефективно реалізувати функції порівняння, обмеження, логічного керування та зворотного зв'язку в режимі реального часу. Завдяки цьому система керування здатна динамічно адаптувати параметри інвертора під змінні умови експлуатації, зберігаючи оптимальний режим роботи тягового електропривода.

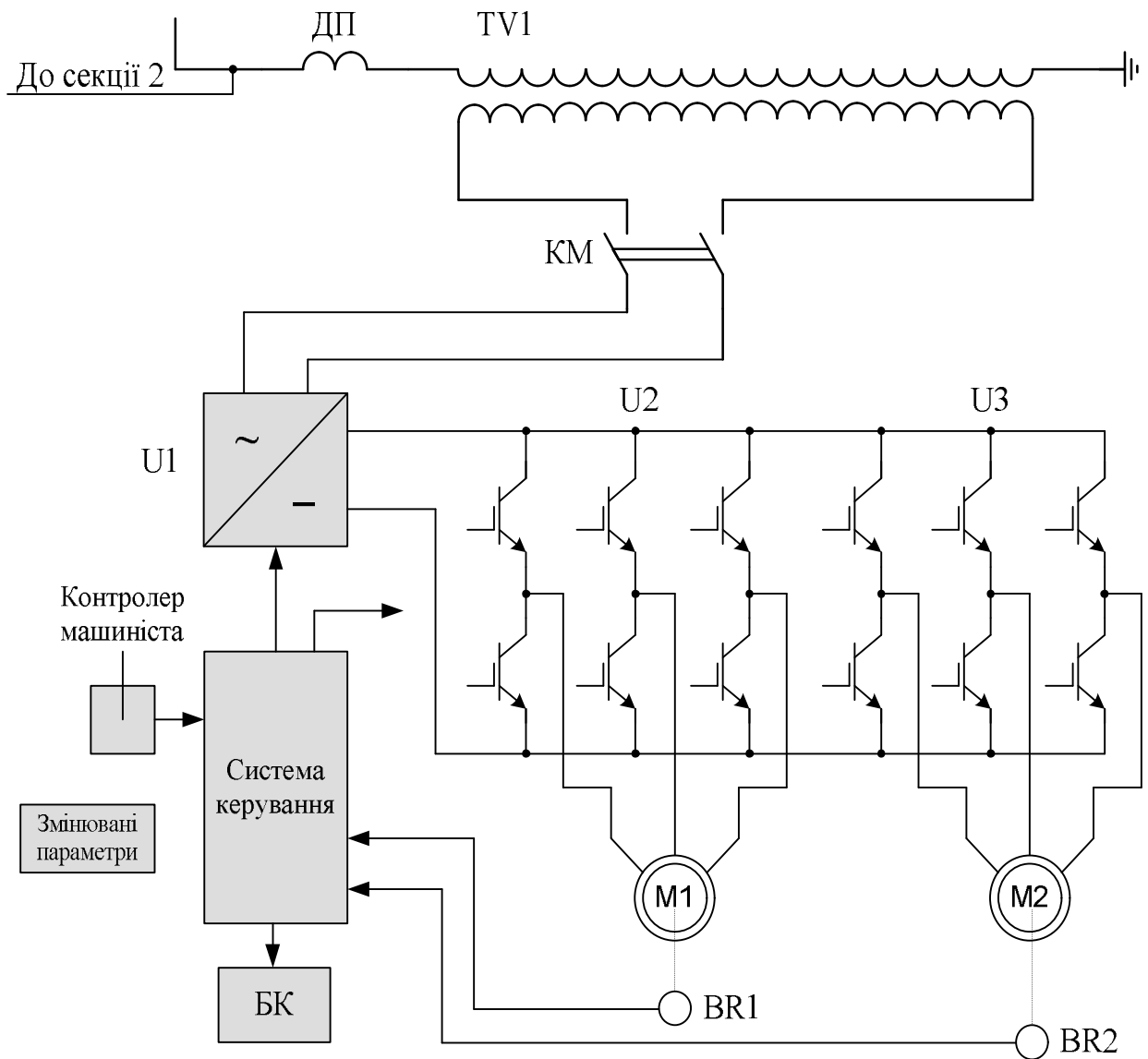


Рисунок 4.3 – Структурна схема силової частини асинхронного тягового привода електровоза

Система керування отримує команди від контролера машиніста, а також сигнали від пристроїв, що задають змінні параметри, наприклад, обмеження максимальної швидкості руху відповідно до умов відкатки. До основних вхідних сигналів цієї системи належать дані про кутову швидкість обертання кожного з двигунів, а також інформація про режими роботи силових перетворювачів, зокрема значення струмів і напруг у силових ланцюгах. На основі цих вхідних даних система формує керуючі сигнали, які надходять до перетворювачів для забезпечення заданого режиму роботи тягового привода.

4.4 Вибір силових елементів схеми електричної структурної системи електропривода електровоза

4.4.1 Розрахунок і вибір трансформатора

У системі електроприводу електровоза трансформатор виконує функцію узгодження напруги живильної мережі з робочою напругою, необхідною для приводних електродвигунів.

Фазну напругу на вторинній обмотці трансформатора можна визначити за наступною формулою [6]:

$$U_{2\phi} = k_1 k_2 k_3 U_H, \quad (4.1)$$

де k_1 — коефіцієнт запасу по напрузі мережі, ($k_1=1,05$);

k_2 — коефіцієнт запасу по напрузі, що враховує неповне відкривання транзисторів при максимальному куті управління, ($k_2=1,06$);

k_3 — коефіцієнт запасу по напрузі, що втрачається в обмотках трансформатора, ($k_3=1,02$);

$$U_{2\phi} = 1,05 \cdot 1,06 \cdot 1,02 \cdot 950 = 1073(\text{В}).$$

Типова (габаритна) потужність трансформатора:

$$S_m = 4 \cdot \frac{k_{s1} + k_{s2}}{2} \cdot P_d + P_{вп} = 4 \cdot k_s P_d + P_{вп} = 4 \cdot k_s U_{2f} I_H + P_{вп}, \quad (4.2)$$

де k_{s1} , k_{s2} , k_s — коефіцієнти схеми випрямлення за потужністю:

$$k_{s1} = \frac{m_1 \cdot k_{i1}}{k_u}, \quad (4.3)$$

$$k_{s2} = \frac{d \cdot k_{i2}}{k_u}, \quad (4.4)$$

$$k_s = \frac{k_{s1} + k_{s2}}{2} \quad (4.5)$$

де m_1 – число фаз первинної обмотки трансформатора ($m_1 = 1$);

k_{i1} , k_{i2} – коефіцієнт схеми випрямлення за струмами первинної і вторинної обмоток трансформатора, відповідно ($k_{i1} = 1$, $k_{i2} = 1$);

k_u – коефіцієнт схеми випрямлення за напругою ($k_u = 0,9$);

d – число вторинних обмоток трансформатора ($d = 1$);

$P_{вп}$ – потужність власних потреб електровоза [2], ($P_{вп} = 225 \text{ кВА}$).

$$k_{s1} = \frac{1 \cdot 1}{0,9} = 1,11,$$

$$k_{s2} = \frac{1 \cdot 1}{0,9} = 1,11,$$

$$k_s = \frac{1,11 + 1,11}{2} = 1,11,$$

$$S_m = 4 \cdot 1,11 \cdot 1073 \cdot 880 + 225000 = 4420 \text{ (кВА)}.$$

Попередньо вибираємо трансформатор [2] за типовою потужністю S_m , первиною напругою $U_{1н}$, та вторинною напругою, $U_{2н}$, орієнтуючись на випрямлену напругу $U_{2ф}$ параметри якого зводимо у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри трансформатора типу ОДЦЕ–5000/25Б

S_n , кВА	$U_{1н}$, кВ	$U_{2н}$, кВ	$U_k\%$, %	$I_0\%$, %	P_0 , кВт	P_k , кВт	$I_{2н}$, А
4485	25	1,2	8,2	1,1	7,2	33,6	1750

Коефіцієнт трансформації:

$$k_{тр} = \frac{U_{1н}}{U_{2н}}, \quad (4.6)$$

$$k_{тр} = \frac{25000}{1200} = 20.83.$$

Діюче значення струму у первинній обмотці трансформатора:

$$I_1 = \frac{\sqrt{3}}{k_{\text{тр}} \cdot \sqrt{m}} \cdot I_{2\text{H}}, \quad (4.7)$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{3}}{20,83 \cdot \sqrt{2}} \cdot 1750 = 102,9 \text{ (A)}.$$

Активний опір однієї фази трансформатора, приведений до вторинної обмотки [7]:

$$R_{\text{тр}} = \frac{1,1 \cdot k_{\text{sl}} \cdot U_{2\text{H}} \cdot \Delta P_{\text{м}}}{m_1 \cdot k_{\text{il}}^2 \cdot I_{2\text{H}} \cdot 100}, \quad (4.8)$$

де $\Delta P_{\text{м}}$ – втрати в міді трансформатора, виражені у відсотках від потужності трансформатора S_{H} .

$$\Delta P_{\text{м}} = \frac{P_0 \cdot 100}{S_{\text{H}}}, \quad (4.9)$$

$$\Delta P_{\text{м}} = \frac{7200 \cdot 100}{4485000} = 0,161 \%,$$

$$R_{\text{тр}} = \frac{1,1 \cdot 1,11 \cdot 1250 \cdot 0,161}{1 \cdot 1^2 \cdot 1750 \cdot 100} = 1,058 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом)}.$$

Індуктивний опір однієї фази трансформатора, приведений до вторинної обмотки [6]:

$$X_{\text{тр}} = \sqrt{\left(\frac{U_{2\phi} \cdot U_{\text{k}}}{100 \cdot I_{2\text{H}}} \right)^2 - R_{\text{т}}^2}, \quad (4.10)$$

$$X_{\text{тр}} = \sqrt{\left(\frac{1073 \cdot 8,2}{100 \cdot 1750} \right)^2 - 0,001058^2} = 0,038 \text{ (Ом)}.$$

4.4.2 Розрахунок випрямляча частотного перетворювача

У системі ПЧ-АД функції випрямлення змінної напруги та регулювання її середнього значення в автономному інверторі напруги розділені. Випрямлення здійснюється за допомогою випрямляча, який зазвичай побудований за трифазною мостовою схемою. Після випрямлення напруга згладжується за допомогою ємнісного фільтра (іноді L-C-фільтра).

Розрахунок випрямляча та силового фільтра має на меті визначити та обрати відповідні силові компоненти пристрою. Передусім необхідно виконати розрахунок і вибрати з довідкових матеріалів силові ключі для некерованого випрямляча. Вибір виконується по наступним параметрам:

- по максимально допустимій зворотній напрузі $U_{зв\max}$;
- по максимально допустимому середньому струму $I_{ср\max}$.

Максимальна напруга на діоді:

$$U_{\max} = \sqrt{2} k_{\text{зн}} U_{\text{л}}, \quad (4.11)$$

$$U_{\max} = \sqrt{2} \cdot 1,3 \cdot 2430 = 4422 \text{ (В)}$$

$$U_{\max} = \sqrt{2} \cdot 1,3 \cdot 1200 = 2,18 \text{ (кВ)}$$

де – коефіцієнт запасу по напрузі, ($k_{\text{зн}}=1,4$);

$U_{\text{л}}$ – напруга вторинної обмотки трансформатора.

Середній струм через діод:

$$I_{\text{ср}} = \frac{\lambda I_{\text{н}}}{3}, \quad (4.12)$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{2,5 \cdot 900}{3} = 750 \text{ (А)}$$

Середній струм, приведений до класифікаційних параметрів діода:

$$I_{\text{пр}} = k_{\text{зс}} I_{\text{ср}}, \quad (4.13)$$

$$I_{\text{пр}} = 1,6 \cdot 750 = 1200 \text{ (A)}$$

де – коефіцієнт запасу по струму, ($k_{zc}=1,6$);

Вибираємо діоди таким чином, щоб виконувалися наступні вимоги:

$$\begin{cases} U_{\text{обр max}} > U_{\text{max}}; \\ I_{\text{пр max}} > I_{\text{пр}}. \end{cases} \quad (4.14)$$

Таблиця 4.2 – Параметри діода Д133–1000 [7]

Тип	$U_{\text{обр}}, \text{ В}$	$I_{\text{обр}}, \text{ МА}$	$I_{\text{српр}}, \text{ А}$	$I_{\text{уд}}, \text{ кА}$	$U_{\text{имп}}, \text{ В}$
Д133–1000	2200–4600	50	1250	16	4,4

Згладжувальна дія фільтра оцінюється по величині його коефіцієнта згладжування, який визначається за формулою:

$$k_{\text{сг}} = \frac{k'_{\text{п}}}{k_{\text{п}}}, \quad (4.15)$$

де $k'_{\text{п}}$ – коефіцієнт пульсацій на вході фільтра;

$k_{\text{п}}$ – коефіцієнт пульсацій на виході фільтра.

Розкриваючи ці коефіцієнти отримаємо:

$$k_{\text{сг}} = \frac{U'_{(1)\text{м}} / U'_d}{U_{(1)\text{м}} / U_d}, \quad (4.16)$$

де $U'_{(1)\text{м}}, U'_d$ – амплітуда основної гармоніки напруги и постійна складова напруги на вході фільтра відповідно;

$U_{(1)\text{м}}, U_d$ – амплітуда основної гармоніки напруги и постійна складова напруги на виході фільтра відповідно.

Нехтуючи втратами в фільтрі, наближено можна визначити коефіцієнт згладжування за формулою:

$$k_{cr} \approx \frac{U'_{(1)m}}{U_{(1)m}}, \quad (4.17)$$

Якщо опір навантаження значно перевищує ємнісний опір конденсатора, можна вважати, що змінна складова струму через діоди дорівнює струму конденсатора, а постійна складова — струму навантаження. У цьому випадку амплітуда основної гармоніки напруги на виході фільтра визначається за формулою:

$$U_{(1)m} \approx \frac{I_n}{2\omega_0 C_\phi}, \quad (4.18)$$

де ω_0 — кутова частота напруги, ($\omega_0=314 \text{ c}^{-1}$);

Отже, коефіцієнт пульсацій на виході фільтра складе:

$$k_n = \frac{U_{(1)m}}{U_d} = \frac{I_d}{2\omega_0 C_\phi U_d}, \quad (4.19)$$

Задаючи коефіцієнтом пульсацій 10 % ($k_n = 0,1$), отримаємо з (5.19) ємність конденсатора фільтра:

$$C_\phi = \frac{I_n}{2U_n k_n \omega_0}, \quad (4.20)$$

$$C_\phi = \frac{900}{2 \cdot 1500 \cdot 0,1 \cdot 314} = 9,6 \text{ мФ}$$

Оскільки величина необхідного конденсатора виходить занадто великою і є неприйнятною, від простого ємнісного фільтра (С-фільтра) слід відмовитися на користь Г-подібного індуктивно-ємнісного фільтра (LC-фільтра). Розрахунок такого фільтра здійснюється за наведеною методикою.

Індуктивність дроселя вибирається із умови неперервності струму в ньому.

$$L_{\phi} > \frac{0,075R_d}{6\omega_0}, \quad (4.21)$$

де R_{Σ} – опір обмоток двигуна [5], ($R_{\Sigma} = 0,991 \text{ Ом}$).

$$L_{\phi} > \frac{0,075 \cdot 0,991}{6 \cdot 314} = 0,039 (\text{мГн}).$$

Вибираємо [6] дросель із стандартним значенням індуктивності $L_{\text{здр}}$ та його активним опором $R_{L_{\text{здр}}}$, технічні дані якого заносимо у таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 Технічні дані згладжувального дроселя СРОСЗ-800МУХЛ4 [7]

Тип	$L_{\text{здр}}$, мГн	$R_{L_{\text{здр}}}$, мОм	$I_{\text{здр}}$, А
СРОСЗ-3200МУХЛ4	0,08	1,1	6300

Визначаємо ємність фільтруючого конденсатора [6]:

$$C_{\phi} = \frac{k_{\text{зп}} + 1}{p^2 \omega_0^2} \quad (5.21)$$

де p – пульсаційність схеми ($p=2$);

$k_{\text{зп}}$ – коефіцієнт згладження пульсації, приймаємо ($k_{\text{зп}}=3$).

$$C_{\phi} = \frac{3+1}{2^2 \cdot 314^2} = 10,14 (\text{мкФ}).$$

Вибираємо конденсатор [7] із стандартним значенням типу К73-11 11 мкФ, 2500 В (10%).

4.4.3 Вибір транзисторів і шунтуючих діодів

Вибір транзисторів проводиться за наступними параметрами [6]:

- по максимальному струму переходу емітер-колектор у відкритому стані через транзистор $I_{\text{кmax}}$;

- по максимальній напрузі переходу емітер-колектор транзистора $U_{\text{кемах}}$.

Також слід обирати транзистори з якомога меншим часом перемикання — включення і виключення — щоб забезпечити максимально високу частоту комутації.

Максимальний допустимий струм якоря за умов комутації:

$$I_{\text{доп}} = \lambda I_{\text{н}}, \quad (4.22)$$

$$I_{\text{доп}} = 2,5 \cdot 900 = 2250 \text{ (A)}$$

Максимальний струм якоря, приведений за класифікаційними параметрами транзистора:

$$I_{\text{max}} = k_{\text{зі}} k_{\text{охл}} I_{\text{доп}}, \quad (4.23)$$

де — коефіцієнт запасу за струмом, ($k_{\text{зі}} = 1,5$);

$k_{\text{охл}}$ — коефіцієнт, що враховує охолодження, ($k_{\text{охл}} = 1,2$).

$$I_{\text{доп}} = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 2250 = 4050 \text{ (A)}$$

Максимальна напруга, яка прикладається до транзистору під час його замикання:

$$U_{\text{max}} = \sqrt{2} k_{\text{зн}} U_{\text{н}}, \quad (4.24)$$

де $k_{\text{зн}} = 1,2$ коефіцієнт, що враховує перенавантаження,

$$U_{\text{max}} = \sqrt{2} \cdot 1,3 \cdot 1870 = 3403 \text{ (B)}$$

Вибираємо транзистори за такими вимогами:

$$\begin{cases} I_{\text{к max}} > I_{\text{max}}; \\ U_{\text{кэ max}} > U_{\text{max}}. \end{cases} \quad (4.25)$$

Вибираємо транзистор типу [8] SKiP3614GB17E4-6DUL з такими характеристиками: $I_{k\max}=4$ кА, $U_{ке\max}=3,4$ кВ.

За розрахованими параметрам максимального струму і напруги з довідників вибираємо шунтуючі діоди, що задовольняють умовам:

$$\begin{cases} I_{\text{пр max}} > I_{\text{max}}; \\ U_{\text{обр max}} > U_{\text{max}}. \end{cases} \quad (4.26)$$

Заносимо параметри вибраного діода в таблицю 4.3.

Таблиця 4.4 – Параметри діода ДЛ173- 4000 [9]

Тип	$U_{\text{обр}}, \text{В}$	$I_{\text{српр}}, \text{А}$	$I_{\text{уд}}, \text{кА}$	$U_{\text{имп}}, \text{В}$
ДЛ173- 4000	2400-4000	4040	50	2,4

Для транзисторного електроприводу з перетворювачем частоти важливим параметром є оптимальна частота комутації, яка може бути обчислена за формулою:

$$f_{\text{опт}} = k_f \sqrt[3]{\frac{\beta R_{\text{я}}^2}{L_{\text{я}}^2 (t_+ + t_-)}}, \quad (4.27)$$

де k_f –коефіцієнт пропорційності, ($k_f= 0,332$);

t_+ , t_- – час наростання і спаду колекторного струму транзистора;

$$\beta = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}} R_{\Sigma}}, \quad (4.28)$$

$$f_{\text{опт}} = 0,332 \sqrt[3]{\frac{1,089 \cdot 0,991^2}{(39,8 \cdot 10^{-3})^2 (100 + 60) 10^{-9}}} = 536,5 (\text{Гц}).$$

4.5 Розробка системи керування електропривода та вибір елементів кола керування

Аналізуючи електричну структурну схему асинхронного тягового приводу електровоза, наведеної на рисунку 4.2, можна виділити основні елементи системи керування: контролер машиніста, датчики вимірюваних параметрів, мікропроцесорний блок керування та бортовий (панельний) комп'ютер. Оскільки в цій кваліфікаційній роботі передбачено модернізацію системи електропривода електровоза з тяговими двигунами змінного струму, приділимо увагу кожному з цих елементів, проведемо їх аналіз, а при необхідності — розрахунок і вибір.

4.5.1 Контролер машиніста типу КМЕ-80 електровоза

На рисунку 4.4 наведена схема розміщення окремих елементів системи керування електроприводу, зокрема контролера машиніста типу КМЕ-80. Система керування електроприводу електровоза ДСЗ передбачає впровадження мікропроцесорного блоку керування електроприводом (МСКЕ), який виконує функції управління приводом та контролю за станом усієї системи керування.

Після заміни застарілого варіанту системи електропривода на МСКЕ змінюється конструкція та принцип роботи контролера машиніста КМЕ. Основні відмінності в роботі контролера КМЕ в цій конфігурації полягають у наступному:

- за допомогою руків'я контролера КМЕ машиніст встановлює необхідне значення струму, яке МСКЕ автоматично підтримує відповідно до положення руків'я;
- в режимі рекуперативного гальмування (РГ) за допомогою гальмівного руків'я машиніст задає цільову швидкість руху, до якої МСКЕ автоматично знижує швидкість шляхом електричного гальмування;

- інформація про режим роботи локомотиву під управлінням МСКЕ виводиться на монітор бортового комп'ютера.



Реверсор Гальмівне руків'я Руків'я контролера КМЕ

Рисунок 4.4 – Схема розташування елементів системи керування

Конструкція контролера машиніста із вказівкою основних її вузлів приведена на рисунках 4.5, 4.6.

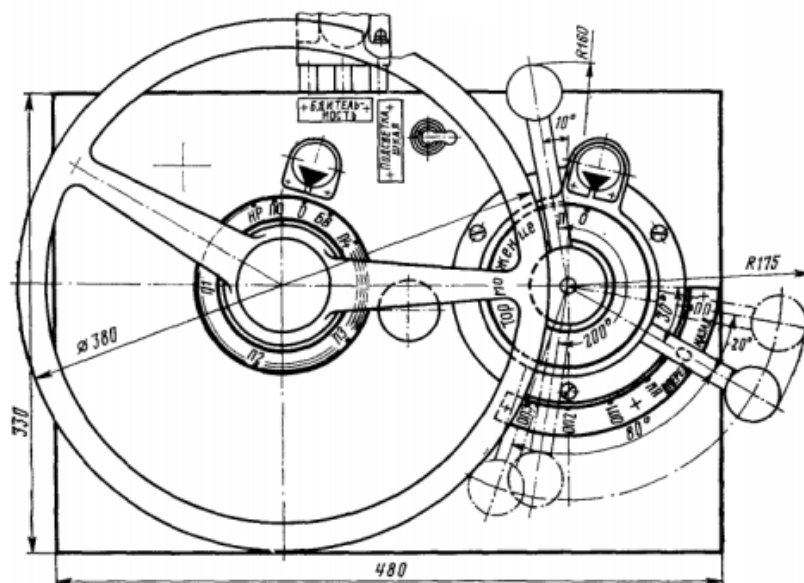


Рисунок 4.5 – Конструкція контролера КМЕ

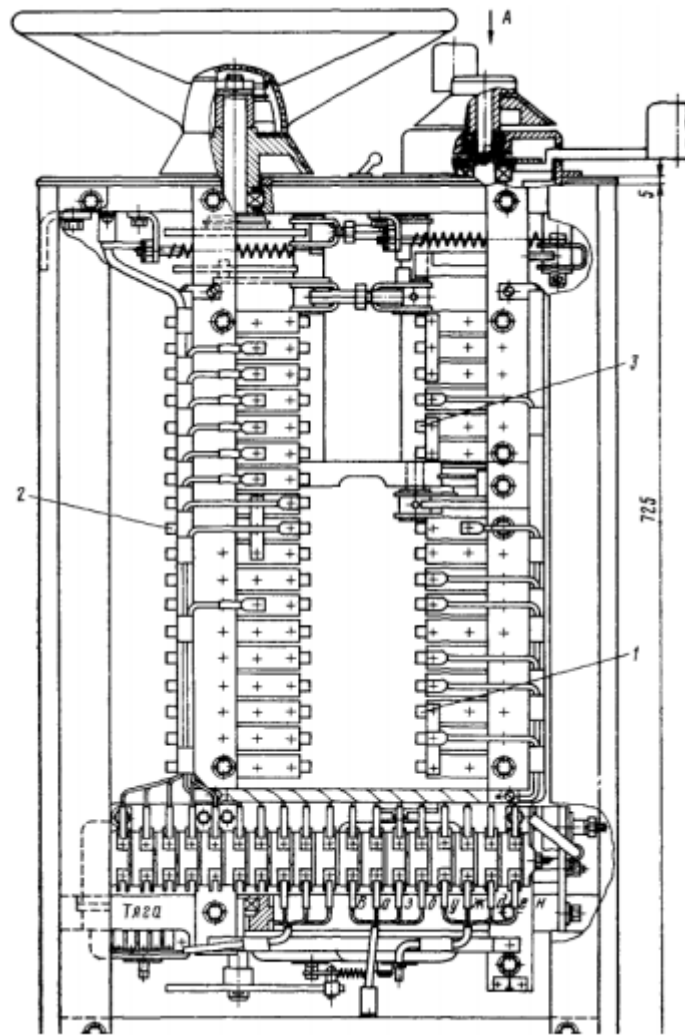


Рисунок 4.6 – Конструкція контролера КМЕ:

- 1 – гальмівний перемикач;
- 2 – головний перемикач;
- 3 – реверсивний перемикач.

4.5.2 Сенсори струму

Для реалізації зворотних зв'язків в електричне коло кожного із тягових двигунів (ТЕД) встановлюються сенсори струму серії LTC (вимірювальні трансформатори струму) (рисунок 4.7). Всього на електровоз встановлюється 4 сенсори струму, по 2 на кожен приводний двигун. Для кожних двох сенсорів струму встановлюється окрема панель живлення.

Сенсори струму встановлюються у високовольтній камері електровоза

(рисунок 4.8). Інформація із сенсорів струму надходить в МСКЕ, де використовується для аналізу і подальшого керування електровозом.



Рисунок 4.7 – Зовнішній вигляд сенсорів струму серії LTC



Рисунок 4.8 – Сенсор струму та панель спраження МСКЕ на електровозі

4.5.3 Сенсори швидкості

Для керування в МСКЕ надходить інформація про швидкість руху локомотива. Сам МСКЕ не має власних датчиків швидкості, а використовує наявні на електровозі сенсори. Контроль швидкості здійснюється по обох колісних парах (КП). Для підключення до цих сенсорів застосовуються штатні блоки спряження (див. рисунок 4.9), які встановлюються в шафі в кабіні машиніста.



Рисунок 4.9 – Загальний вигляд блоку спряження для сенсорів швидкості

4.5.4 Мікропроцесорний блок системи керування електровозом

Основу мікропроцесорної системи керування електровозом (МСКЕ) складає мікропроцесорний блок Л208.00.00-01 (виробництва ЗАТ «Електро Сі»), загальний вигляд якого показаний на рисунку 4.10. Дана мікропроцесорна система розроблена та адаптована спеціально для потреб залізничного тягового транспорту.

Мікропроцесорна система керування і діагностування (МСКЕ) призначена для управління тяговим електроприводом магістрального електровоза змінного струму ДСЗ. Вона забезпечує автоматичний і ручний режими керування тягою та рекуперативним гальмуванням із підтримкою

заданих значень струму та швидкості. Крім того, МСКЕ виконує діагностику стану обладнання електровоза і передає діагностичну інформацію на бортовий комп'ютер у кабіні машиніста. Завдяки цьому система дозволяє реалізувати інтелектуальне управління електровозом ДСЗ. Основна мета МСКЕ — підвищення ефективності експлуатації цих електровозів.



Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд мікропроцесорного блоку МСКЕ на стенді

Впровадження МСКЕ на електровозах ДСЗ дає комплексний ефект підвищення якості електричної тяги, насамперед – в рекуперації (режимі РГ).

Електровози серії ДСЗ оснащені системою рекуперативного гальмування на змінному струмі. Теоретично ефективність рекуперативного гальмування може досягати 20–25%, однак на сьогодні вона не перевищує 7%. Мінімально необхідний рівень ефективності становить 15%, тому підвищення цього показника є важливим техніко-економічним завданням.

З впровадженням МСКЕ очікується, що ефективність рекуперації на електровозах ДСЗ зросте до 15%.

Другим за значущістю результатом впровадження МСКЕ є збільшення дільничної швидкості на тривалих спусках. Завдяки стабільному переходу в режим рекуперативного гальмування на високих швидкостях, швидкість руху на таких ділянках підвищується у 1,5–2 рази.

Додаткову користь приносить автоматизоване стаціонарне робоче місце (АРМ) для аналізу даних, що надходять з МСКЕ. Комплексний аналіз режимів роботи електровозів допоможе покращити умови експлуатації зміннотоккових електровозів на залізницях України.

Мікропроцесорний блок МСКЕ встановлюється в кожну секцію електровоза у спеціальному металевому корпусі, разом із панеллю живлення. Конструкція блоку складається з взаємозамінних плат та модулів (див. рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Електронна плата змінного модуля блока МСКЕ

4.5.5 Бортовий комп'ютер (монітор)

Ще одним ключовим апаратним елементом МСКЕ є бортовий комп'ютер, який встановлюється в кожній кабіні машиніста. Хоча бортовий комп'ютер (БК) безпосередньо не керує рухом поїзда, він виконує роль монітора — збирає, аналізує та відображає діагностичну інформацію про технічний стан локомотива.

Огляд сучасного стану впровадження інформаційно-обчислювальних систем показує, що не на всіх ринках доступні системи для залізничних локомотивів, здатні одночасно інформувати водія про режими роботи двигунів і автоматично записувати ці параметри з частотою до 1 секунди.

Розглянемо панельні комп'ютери типу Advantech PPC-103T, Eleprom ETC.2-100 та Avalue серії FPC (таблиця 4.1, рисунок 4.12).

Таблиця 4.1 – Порівняльна характеристика панельних комп'ютерів

Основні характеристики	Advantech PPC-103T	Eleprom ETC.2-100	Avalue серії FPC 10W04
Дисплей	10,4 TFT	10,4 TFT	10" Wide LED
Процесор	Intel Pentium III and Intel Celeron	Intel® Atom Z510PT 1,1 ГГц (1,3 ГГц)	Intel® Atom™ N270 1.6GHz CPU
Пам'ять	До 512 MB SODIMM	До 1 ГБ наплатной памяти DDR2 с 400/533 MT/s	One 200-pin SODIMM Socket Supports Up to 2GB DDR2 400/ 533MHz SDRAM
I/O ports	4 serial ports: RS-232 x 3, RS-232/422/485 x 1, 1 parallel port, 2 USB, External VGA port, PS/2 mouse and keyboard, Built-in Mic-in / Line-out jacks	Подключение 3-х любых модулей (RS232, RS485, CAN, DIO, аудио (IN, OUT, MIC))), 1xGLAN, 1xPS/2, 4xUSB 1.0/2.0, 2xUSB 2.0	Line-out, Mic-in, 2 x RJ-45 (Marvell 88E8053 Gigabit Ethernet, 1 x RS-232, 1 x RS-232 or Optional RS-422/ 485, 6 x USB 2.0, 1 x DB-15, Optional USB WiFi 802.11 b/g
Максимальний дозвіл	800 x 600 @ 256 K	800x600	1024 x 600, 256K
Яскравість	230 кд/м²	400 кд/м²	200 кд/м²
Контраст	500:1	500:1	500:1
Температура експлуатації	-25 ~ 45° C	-40 ~ 70° C	-10 ~ 40° C
Габаритні розміри	342 x 265 x 92.4 мм	293x220x85	300x195x56
Вага	3.5 кг	2,3 кг	2.95

Серед великої кількості промислових моделей панельних комп'ютерів розглянемо три добре відомі пристрої, які часто застосовуються для створення бортових систем транспортних засобів, зокрема можуть бути

використані і на залізничному транспорті.

Бортовий комп'ютер (БК) — це промисловий комп'ютер, який при підключенні клавіатури і миші здатен працювати як звичайний персональний комп'ютер (ПК). Основні відмінності БК від ПК полягають у конструктивному виконанні, здатності функціонувати при низьких (від'ємних) температурах, а також наявності додаткових кнопок управління на передній панелі.

В якості центрального пристрою системи обираємо панельний промисловий комп'ютер виробництва фірми Advantech. Зовнішній вигляд панельного комп'ютера зображений на рисунку 6.7.



Рисунок 4.12 – Зовнішній вигляд панельного комп'ютера

Комп'ютер виконаний у вигляді функціонально завершеного моноблока, що включає материнську плату з інтегрованою периферією, рідкокристалічний сенсорний дисплей і блок живлення. Пристрій розрахований на експлуатацію в температурному діапазоні від -25 до $+50^{\circ}\text{C}$, а також здатний працювати в умовах вібрації, підвищеної вологості та

запиленості.

Обчислювальні можливості PPC 103T забезпечує процесор Intel Celeron з тактовою частотою 850 МГц, 128 Мбайт оперативної пам'яті та жорсткий диск об'ємом 100 Мбайт. Рідкокристалічний TFT-дисплей має роздільну здатність 800×600 пікселів та діагональ 10,4 дюйма. Комп'ютер оснащений одним Ethernet-портом зі швидкістю 100 Мбіт/с і двома портами USB 1.1.

Щодо розташування, бортовий діагностичний комп'ютер (БК) встановлюється у кожній кабіні машиніста. Його основне призначення – збір, обробка, збереження та відображення діагностичної інформації, що надходить від МСКЕ під час керування електровозом.

Бортовий комп'ютер (БК) є промисловим пристроєм з операційною системою Windows. При підключенні через USB порт клавіатури та миші він може функціонувати як звичайний персональний комп'ютер. Проте в стандартному режимі керування взаємодія здійснюється виключно за допомогою кнопок, розташованих на передній панелі.

Передня панель містить три групи кнопок, які дозволяють як управляти самим БК (наприклад, переключати екранні форми, налаштовувати час тощо), так і передавати керуючі сигнали на МСКЕ (зміна режиму роботи між ручним та автоматичним, встановлення заданої швидкості в режимі тяги тощо). Кожна кнопка має відповідну позначку, що пояснює її функцію.

4.6 Розробка схеми принципової електричної системи електропривода

Підсумовуючи проведений аналіз і вибір компонентів для інтеграції в систему керування електроприводу локомотива ДСЗ, перейдемо до побудови електричної принципової схеми, яка представлена на рисунку 4.13.

МСКЕ в схемі електричній принциповій виконує наступні функції:

- прийом сигналів завдання від контролера машиніста електровоза (КМЕ);

- прийом та обробка сигналів від сенсорів струму тягових електродвигунів (ТЕД);
- прийом та обробка сигналів від сенсорів швидкості (СШ);
- прийом та обробка сигналів від сенсорів кута комутації;
- прийом та обробка сигналів від сенсорів напруги контактної мережі;
- прийом та обробка сигналів від сенсорів напруги тягових електродвигунів;
- формування нерегульованого кута β у режимі рекуперативного гальмування;
- формування регульованого кута α р;
- реалізація чотирьохзонного алгоритму керування випрямно-інверторними перетворювачами;
- формування керуючих імпульсів по дванадцяти вихідних каналах управління.

Крім того:

- Захист від буксування окремих колісних пар;
- захист від синхронного буксування;
- захист за максимальним струмом;
- захист за швидкістю наростання струму;
- забезпечення плавного переходу в режим рекуперації без різких стрибків струму;
- програмна реалізація регулятора швидкості;
- програмна реалізація регулятора струму;
- збір та накопичення діагностичної інформації з можливістю експорту на переносний комп'ютер або інші носії;
- автоматичний контроль розбіжностей у швидкісних характеристиках тягових електродвигунів;
- технічна діагностика правильності роботи системи з автоматичним захистом від небезпечних режимів при виявленні несправностей;

- збереження інформації у незалежній (енергонезалежній) пам'яті;
- взаємодія з зовнішніми обчислювальними пристроями.

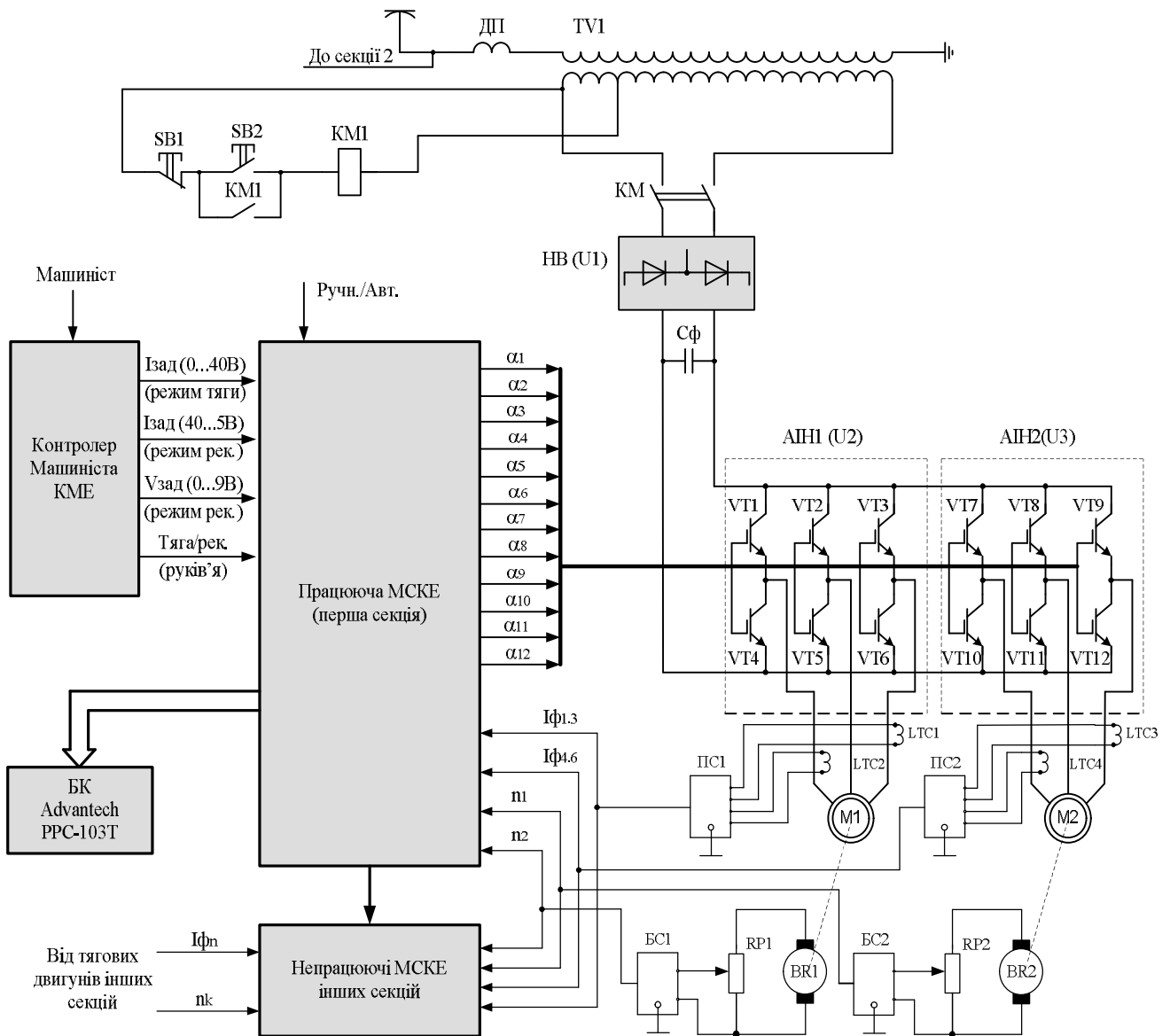


Рисунок 6.9 – Схема електрична принципова мікропроцесорної системи керування електроприводом локомотиву ДС3

Особливості керування МСКЕ

При роботі МСКЕ на електровозі ДС3 виділяють певні особливості керування. Серед них:

1. Номер МСКЕ відповідає номеру секції: 1-й, 2-й, 3-й або 4-й. Номери сигналів із сенсорів прив'язані до номерів колісних пар.
2. Повне живлення отримує тільки керуюча МСКЕ. Решта працюють в

режимі збору інформації, для чого блоки МСКЕ отримують незалежне живлення.

3. У ручному режимі роботи порядок управління електровозом в кабіні машиніста не змінюється. Додаткова інформація виводиться на монітор.

4. Основним режимом роботи електровоза з МСКЕ є автоматичний.

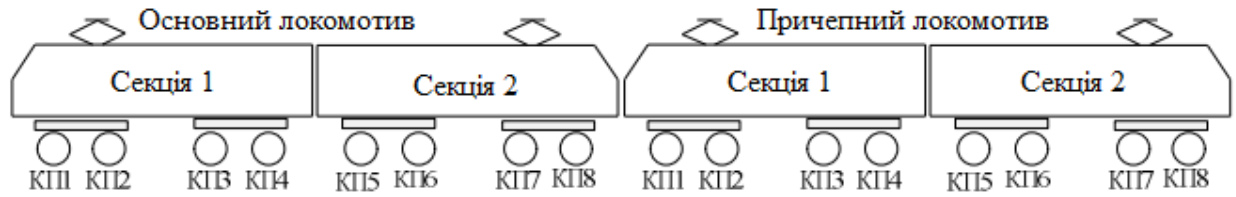
5. Для переходу в ручний режим управління і назад в автоматичний використовується кнопка на передній панелі бортового комп'ютера (БК).

6. В автоматичному режимі штурвал КМЕ управляє заданим струмом. Значення заданого струму відображується на моніторі. Машиніст, обертаючи руків'я, збільшує заданий струм від 50А до 1200А в тязі і до 850А в РГ.

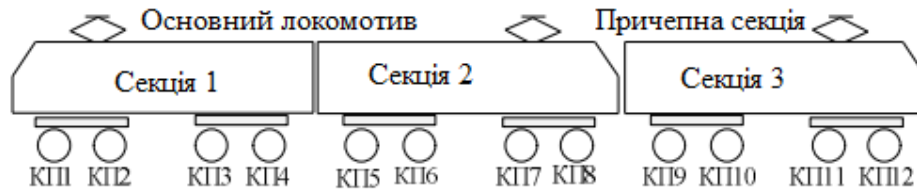
7. В автоматичному режимі гальмівне руків'я контролера КМЕ відповідає за управління заданою швидкістю в режимі рекуперативного гальмування (РГ) і не використовується в режимі тяги. За замовчуванням заданою швидкістю в режимі тяги вважається 90 км/год. Також можливе управління заданою швидкістю через бортовий комп'ютер (БК), при цьому поточне значення завдання відображається на моніторі. Поворотом гальмівного руків'я машиніст може знижувати задану швидкість від 90 км/год до 10 км/год.

Схема, представлена на рисунку 4.13, показує варіант роботи МСКЕ, підключеної до першої секції локомотива. Індекси струмів та швидкостей залежать від кількості секцій локомотива, об'єднаних у єдиний потяг. Взаємодія МСКЕ між секціями потягу ілюструється на рисунку 4.14.

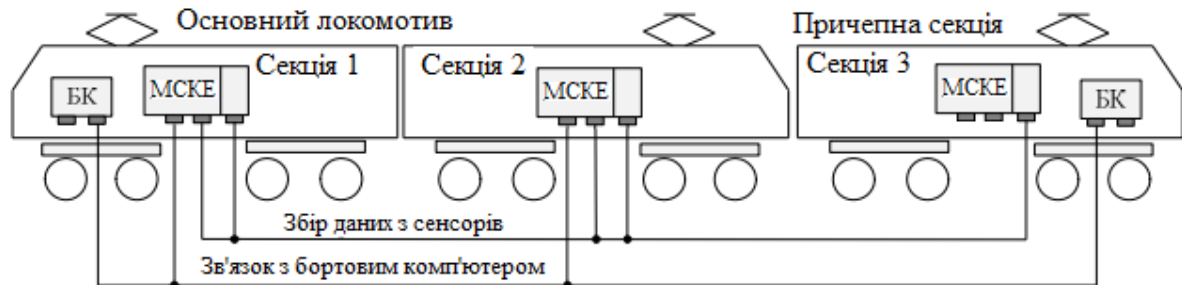
Одна МСКЕ керує всіма секціями локомотива, а перемикання між ними виконується машиністом за допомогою тумблера на пульті управління. У разі трисекційного локомотива, МСКЕ, встановлена в причіпній секції, працює в режимі збору та обробки даних із сенсорів. Крім того, система здатна функціонувати навіть при часткових несправностях сенсорів.



а. Чотирьохсекційне виконання потягу



б. Трьохсекційне виконання



в. Взаємодія МСКЕ по інтерфейсу RS-485

Рисунок 4.14 – Схема виконань потягів та взаємодії МСКЕ секцій

Висновок: У результаті наповнення цього розділу були визначені переваги електротяги змінного струму порівняно з електротягою постійного струму, детально розглянуті основні характеристики та принципи побудови частотних перетворювачів, розроблено структурну та принципову електричну схему системи електропривода електровоза, а також проведено розрахунок і вибір елементів силового кола цієї системи.

5 АЛГОРИТМИ ТА СТІЙКІСТЬ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ В РЕЖИМАХ ТЯГИ ТА РЕКУПЕРАЦІЇ

5.1 Структура програмного забезпечення МСКЕ

Програмне забезпечення МСКЕ складається з трьох основних частин:

- обробка вхідних сигналів — «Вхідний Порт». Це блок програм, який приймає та обробляє вхідні сигнали, формуючи змінні, що використовуються в подальшій роботі системи. Обробка може включати складні операції первинної обробки даних, такі як інтегрування, диференціювання тощо.
- модуль керування випрямно-інверторними пристроями (АІН1, АІН2). Основні завдання цього модуля — формування вихідних команд управління та розрахунок кутів імпульсів керування з урахуванням поточного стану вхідних сигналів.
- модуль автоматичного керування — головний інтелектуальний компонент програмного забезпечення, який відповідає за реалізацію автоматизованих режимів роботи системи.

5.2 Алгоритми автоматичного керування

Програма автоматичного керування МСКЕ здійснює контроль руху локомотива відповідно до завдань машиніста — за заданою швидкістю руху та струмом тягових електродвигунів (ТЕД). Водночас вона відстежує низку важливих обмежень (рисунок 5.1), зокрема щодо зчеплення коліс з рейками, максимальної швидкості, максимального струму, а також інших критеріїв, у тому числі результатів діагностики працездатності системи.

Робота системи авторегулювання в першу чергу спрямована на дотримання обмежень, що накладаються на режим руху поїзда. На початковому етапі руху основними є два обмеження — по максимальному струму та по зчепленню коліс з рейками. Обмеження напруги в модулі АІН

застосовується при виявленні пробуксовування або юзу колісних пар (КП) шляхом порівняння швидкостей обертання окремих колісних пар та розкиду струмів ТЕД. Крім того, контролюється прискорення для виявлення випадків синхронного буксування.

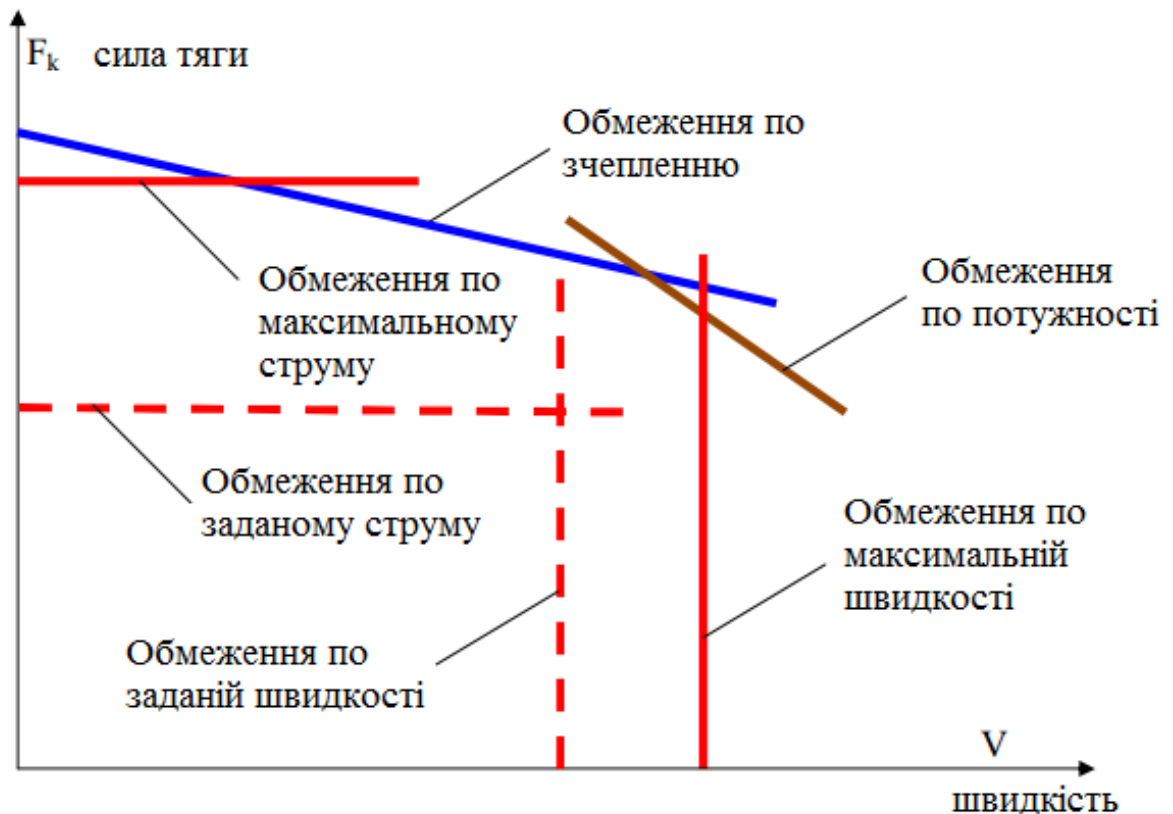


Рисунок 5.1 – Основні програмні захисти МСКЕ

Наступним обмеженням є максимальна допустима та максимальна задана швидкості руху поїзда. Коли швидкість досягає встановленого порогу, струм двигунів знижується за рахунок зменшення напруги на випрямно-інверторних пристроях (ВІП).

Окрім забезпечення максимальної потужності з урахуванням усіх обмежень (рисунок 5.1), модуль автоматичного управління повинен гарантувати стабільність роботи системи, щоб уникнути небажаних коливань (рисунок 5.2). Для цього використовують налаштування часових констант процесу управління — зокрема, темп наростання і спадання потужності силової частини електроприводу — а також реалізують алгоритми ПІ-регулювання.

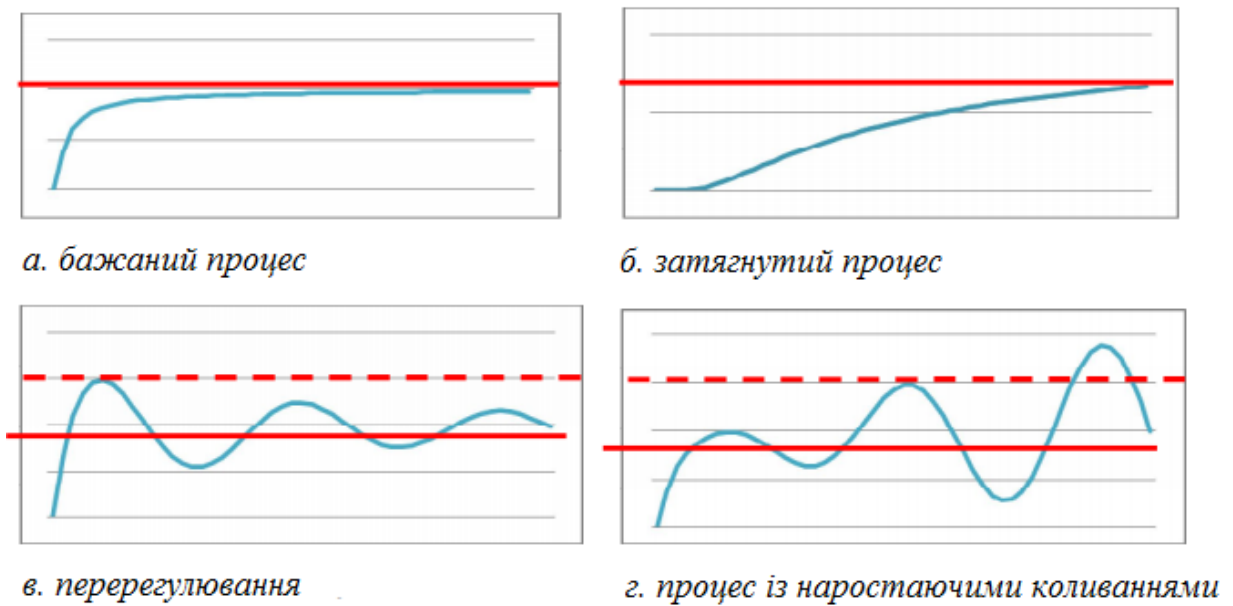


Рисунок 5.2 – Динаміка перехідних процесів МСКЕ

Стійкість системи авторегулювання є найважливішим аспектом у системах з негативним зворотним зв'язком. Надто повільна реакція може спричинити аварійні ситуації, тоді як занадто швидке реагування призводить до виникнення коливань. Обидва ці стани небажані, і МСКЕ має запобігати їх появі. Якщо ж такі явища все ж виникають, система повинна зафіксувати відповідний запис у протоколах роботи з описом режиму, у якому виявлено автоколивання. Усунення несправності здійснюватиметься шляхом перепрограмування МСКЕ після детального аналізу причин аварійного режиму.

Порядок роботи програми МСКЕ наведено як блок-схем алгоритмів, прийнятих у літературі. На рисунку 5.3 наведено блок-схема загального алгоритму роботи МСКЕ. Після початкових операцій читання портів та розрахунку значень сигналів із датчиків (блок 1) програма розраховує завдання, що надходить з контролера машиніста (КМ) – блок 5.1: визначаються значення заданого струму, заданої швидкості та режиму роботи (Тяга або РТ). За наявності команди скидання – блок 2 – програма переходить у режим аварійного завершення ControlBreak (блок 5.7.3).

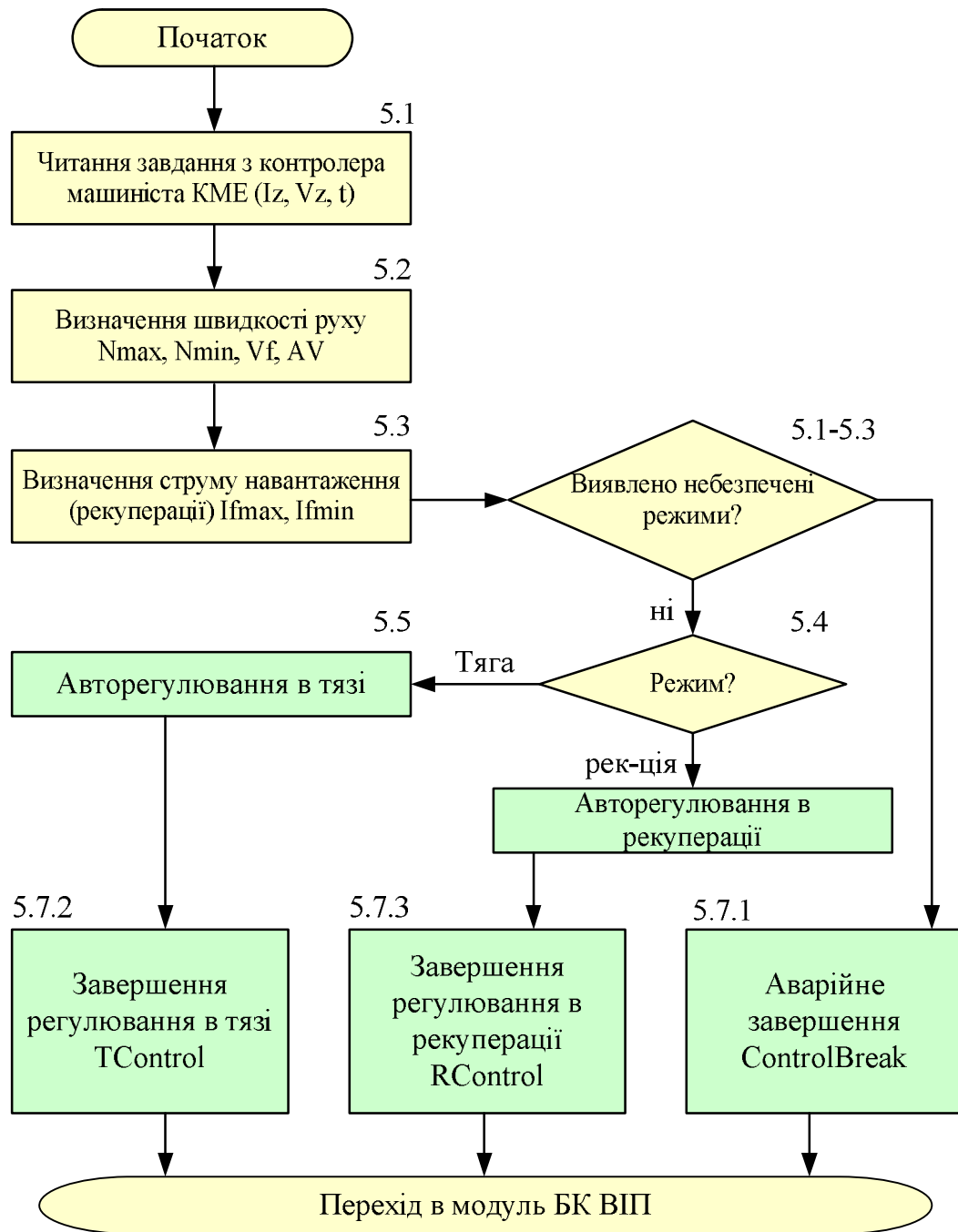


Рисунок 5.3 – Принциповий алгоритм роботи однієї ітерації

Після читання завдання програма розраховує фактичну швидкість руху та прискорення (блок 5.2). У тязі за фактичну швидкість приймається мінімальний сигнал із датчиків швидкості, а в рекуперації – максимальний. У разі виявлення небезпечних режимів боксування, юзу або порушення швидкісного режиму (блок 3) відбувається перехід до аварійного завершення ControlBreak. Далі програма розраховує фактичний струм та швидкість його зміни (блок 5.3). За фактичний приймається максимальний сигнал із датчиків

струму як у тязі, так і в рекуперації. При виявленні небезпечного режиму (блок 4) відбувається перехід до аварійного завершення ControlBreak (блок 5.7.3). Після читання завдання (блок 5.1) та сигналів з датчиків (блоки 5.2 та 5.3) програма переходить у режим авторегулятора у тяговому (блок 5.7.1) або рекупера тивному (блок 5.7.2) режимі. Таким чином, робота МСКЕ є нескінченною послідовністю однотипних операцій, що повторюються кожні 10 мс (з частотою 100 Гц), що відрізняються один від одного тільки вхідними сигналами.

5.4 Алгоритми регулювання в режимі тяги і рекуперації

Управління силою тяги здійснюється машиністом через руків'я контролера, яким задається струм. За замовчуванням встановлена швидкість 90 км/год. Крім цього, передбачена можливість задавати швидкість через монітор, а також активувати режим «круїз-контролю».

Принцип роботи базується на визначенні мінімального темпу зміни напруги силових перетворювачів системи керування, що обчислюється залежно від умов руху.

Спочатку система перевіряє наявність буксування. Якщо буксування виявлено, задається швидкий темп зниження потужності, і програма завершує цикл.

Якщо буксування відсутнє, активується алгоритм регулятора швидкості, який використовує пропорційний темп наростання потужності на низьких швидкостях, а при швидкості, близькій до заданої — ПІ-регулятор. Після цього система переходить у режим регулятора струму.

Регулятор струму забезпечує швидке збільшення струму при значній різниці між заданим і фактичним струмом та переходить на роботу ПІ-регулятора при наближенні фактичного струму до заданого (див. рисунок 5.4).

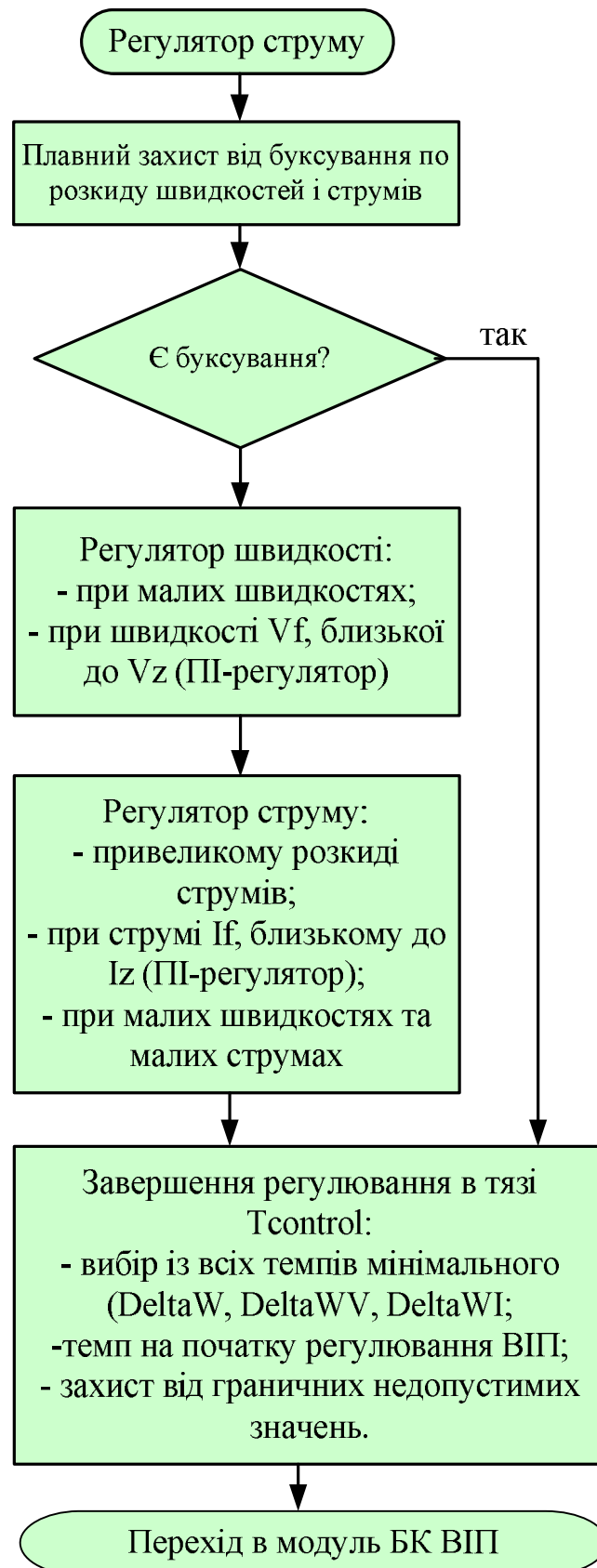


Рисунок 5.4 – Принциповий алгоритм роботи у тяговому режимі

Задані значення параметрів на електровозі перевищувати не можна за

умовами безпеки руху, тому регулювання швидкості і струму ведеться на значення, менше заданого: швидкість на 5 км / год, а струм – на 25А (рисунок 5.5).

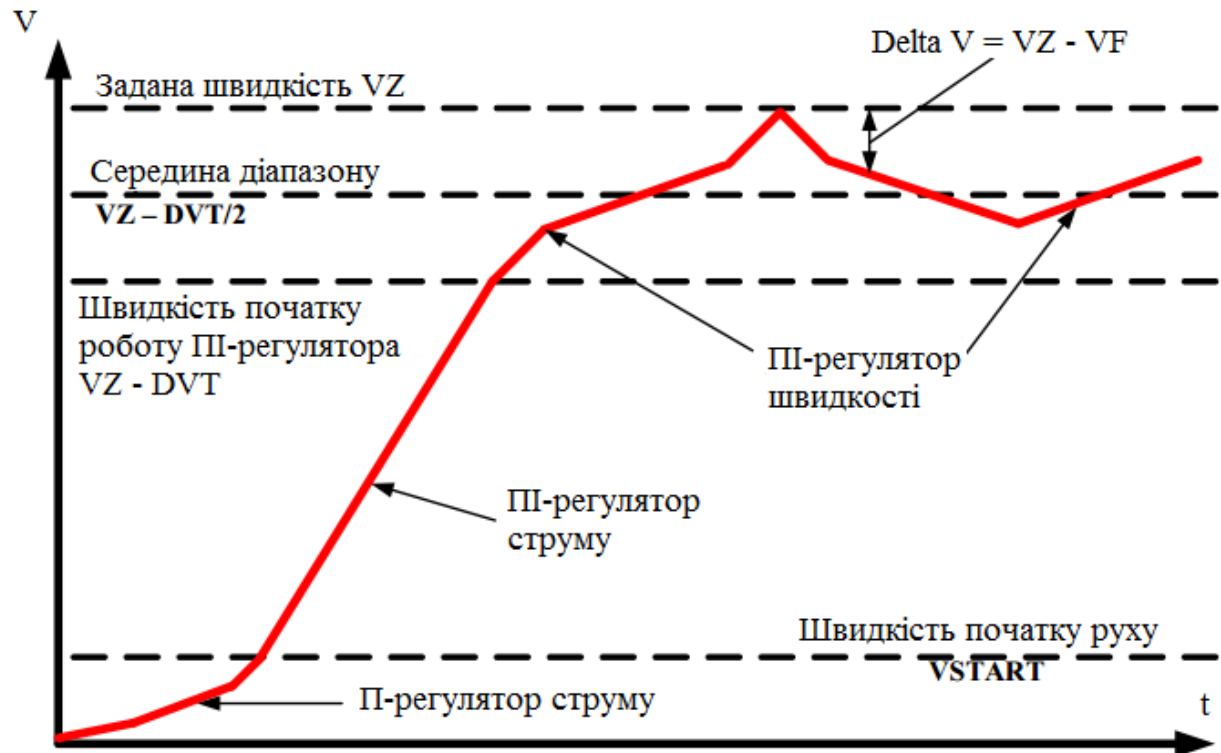


Рисунок 5.5 – Характер зміни потужності в регуляторі швидкості в режимі тяги

Після роботи регулятора струму вибирається мінімальний темп зміни, обчислений раніше. Далі визначається зона управління. Після цього робота регулятора у тяговому режимі завершується.

Примітка: у ручному режимі програма одразу переходить до відповідного програмного модуля без виконання захисних функцій та функцій авторегулювання.

На рисунку 5.5 показано порядок керування швидкістю руху поїзда. Фактично, при значній різниці між заданою та фактичною швидкостями МСКЕ управляє струмом, підтримуючи максимально можливе значення відповідно до завдання машиніста (через руків'я КМЕ) та накладених обмежень.

У міру наближення фактичної швидкості до заданої струм двигунів починає знижуватись — зменшуються зони управління випрямно-інверторного перетворювача (ВІП), а отже, знижується напруга на двигуні.

Якщо швидкість перевищує середину діапазону, струм плавно зменшується аж до повного відключення ВІП.

Автоматичного переходу в режим рекуперативного гальмування (РГ) не відбувається, тому швидкість може перевищувати задане значення, наприклад, на спусках. Відповідальність за безпеку руху в таких випадках покладається на машиніста.

При зборі рекуперації (рисунок 5.6) швидкість ще може вирости (працює П-регулятор збільшення струму збудження і потім потужності силової частини системи керування).

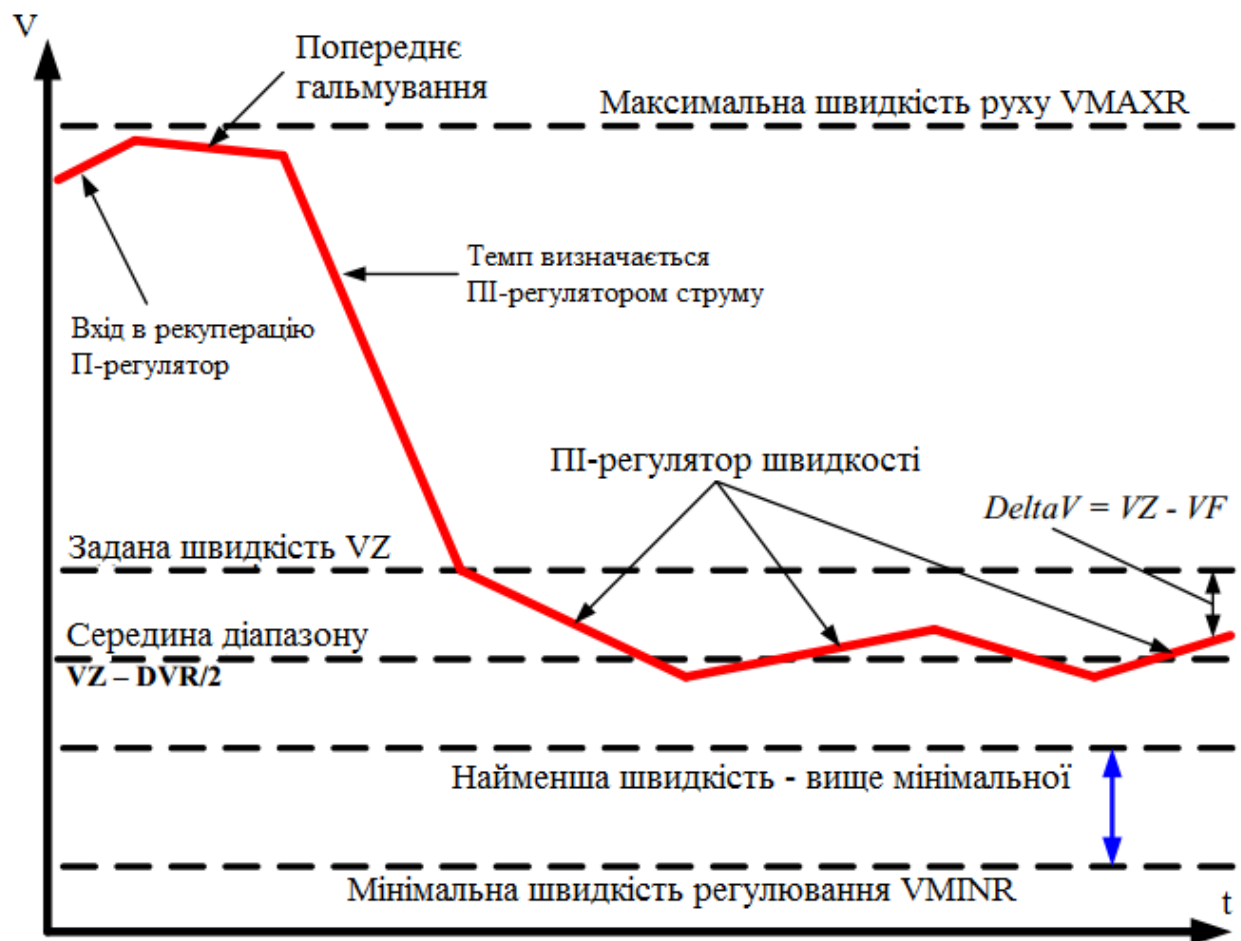


Рисунок 5.6 – Етапи авторегулювання в режимі рекуперації

Після входу в режим рекуперативного гальмування швидкість знижується з темпом, що відповідає попередньому гальмуванню. Далі темп зниження швидкості регулюється залежно від заданого гальмівного струму. Коли швидкість наближається до заданої (зверху вниз), в роботу вступає ПП-регулятор швидкості, який знижує струм до значення, меншого за задане, поступово наближаючи його до нуля. Якщо швидкість стає меншою за межі діапазону регулювання, режим рекуперативного гальмування припиняється.

Головна відмінність авторегулювання в рекуперації від регулювання в тязі: необхідність початкової установки 4-ї зони при включенні рекуперації; • необхідність увійти до рекуперації з протикомпаундуванням; • регулювання струму та швидкості з використанням ВІП та ВУВ. При збиранні рекуперації швидкість ще може зрости (працює ПП-регулятор збільшення струму збудження і потім потужності ВІП). Після входу в рекуперацію швидкість знижується у темпі попереднього гальмування. Потім у темпі, що залежить від заданого гальмівного струму. Коли швидкість наближається до заданої (згори донизу), у роботу вступає ПП-регулятор швидкості: струм стає менше заданого до нуля. Якщо швидкість стає меншою за задану на діапазон регулювання, то рекуперація припиняється.

5.5 Система рекуперації енергії електропотяга ДСЗ із використанням інерційних накопичувачів енергії

Виходячи із закону збереження енергії [13, 14], кінетичну енергію, накопичену під час руху транспортного засобу, завжди можна перетворити в інші види енергії. Існує багато методів перетворення енергії електричного гальмування [15–18] із подальшим її використанням в електричних рухомих тягових пристроях (ЕРТ).

Одним із основних напрямків зниження електроспоживання поїздів є повернення електричної енергії в мережу або її передача в накопичувач енергії (НЕ) під час електричного гальмування. За таких умов

електротранспорт може віддавати в мережу до 40 % спожитої ним енергії, що одночасно суттєво знижує знос механічних гальмівних пристроїв.

Рекуперативне гальмування має такі основні техніко-економічні переваги електричної тяги з рекуперацією [13]:

- зниження питомої витрати електроенергії на тягу поїздів за рахунок повернення енергії в контактну мережу і зменшення споживання на власні потреби електровоза;

- підвищення технічної швидкості руху завдяки особливостям характеристик рекуперативного гальмування — підтримка постійної швидкості на спусках замість перепадів при поєднанні пневматичного гальмування і вибігу;

- збільшення середньодобового пробігу і продуктивності локомотива за рахунок підвищення технічної швидкості та зниження часу простою на станціях (відсутність масової заміни гальмівних колодок);

- економія електроенергії під час рекуперативного гальмування;

- економія на заміні гальмівних колодок [12];

- зменшення потреби в обточуванні колісних пар.

Потрібно не забуватися, що застосовуючи класичне рекуперативне гальмування, вноситься ряд негативних особливостей в роботу системи тягового електропостачання[13]:

- завантажуючи мережу значними реактивними струмами, електровоз знижує напругу тягової мережі, що негативно позначається на інших електровозах у тяговому режимі — у деяких випадках це може призвести до зниження пропускної спроможності ділянки;

- негативний вплив на залізничну колію (зсув рельсошпальної решітки, характерний для рекуперативного гальмування в цілому);

- особливості роботи випрямно-інверторних перетворювачів рекуперуючих електровозів істотно впливають на показники якості електричної енергії, що є окремим комплексом проблем: знижена якість

електроенергії негативно позначається не тільки на роботі електрифікованої лінії, але й на роботі споживачів, підключених до неї, що може спричинити поломки цілих систем.

Для наочності подання варіантів використання кінетичної і потенційної механічної енергії транспортного засобу розглянута класифікаційна структурна схема, представлена на рисунку 5.7.

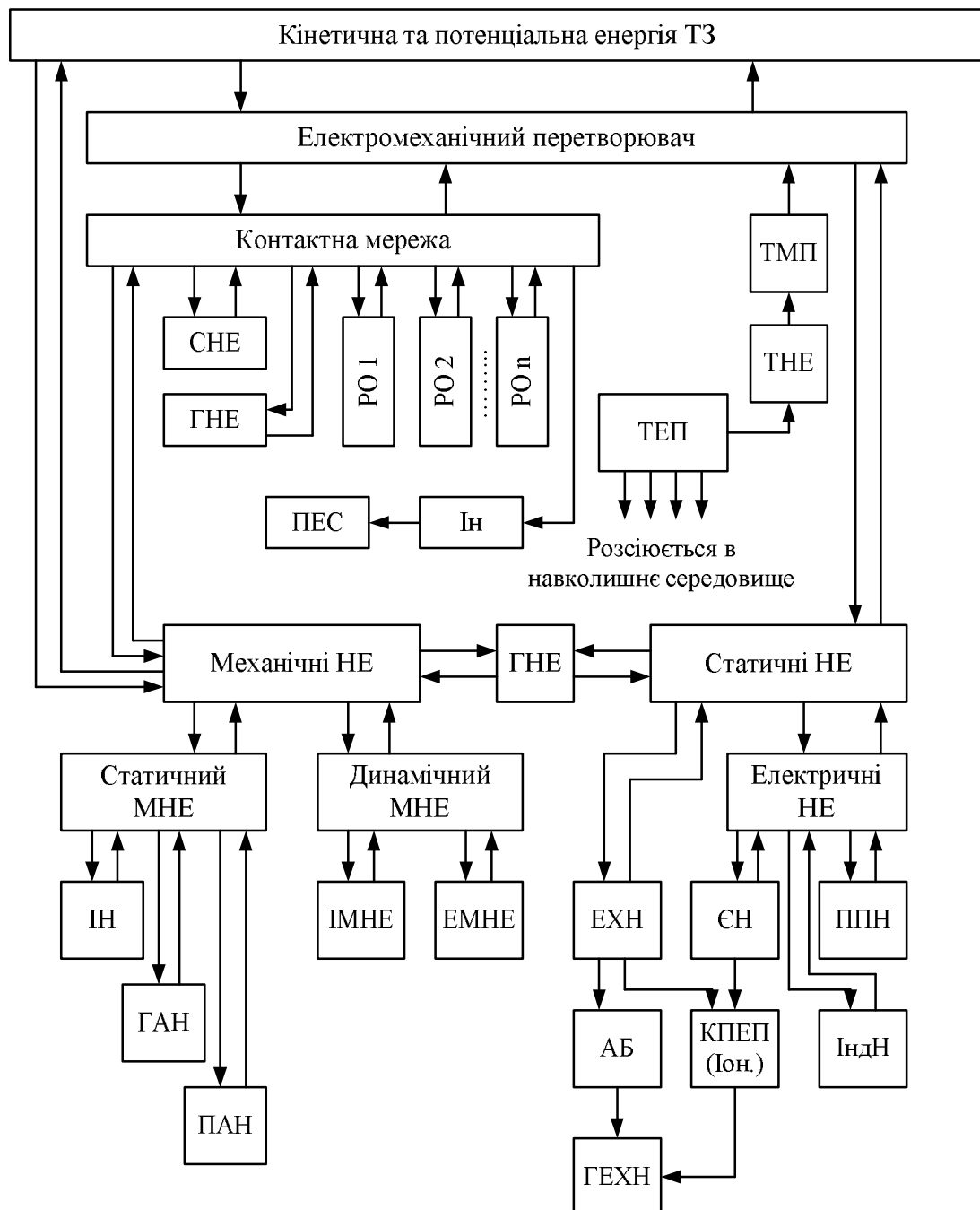


Рисунок 5.7 – Структурна схема перетворення кінетичної і потенційної механічної енергії транспортного засобу при гальмуванні

В даний час відомі різні типи накопичувачів енергії: гідроакумуючі (ГА), повітроакумуючі (ПА), електрохімічні (ЕХ), електромеханічні (ЕМ), механічні, інерційні, ємнісні, надпровідні, індуктивні і т.д.

На рисунку 5.7 позначено: РО – рухома одиниця; НЕ – накопичувач енергії; ГНЕ – гібридний накопичувач енергії; МНЕ – механічний НЕ; СМНЕ – статичний МНЕ; ДМНЕ – динамічний МНЕ; ІН – інерційний накопичувач; ЕМНЕ – електромеханічний накопичувач енергії; ІМНЕ – інерційно-механічний НЕ; ТЕП – тепловий механічний перетворювач; ТНЕ – тепловий НЕ; ТМП – тепловий механічний перетворювач; Ін – інвертор; ПЕС – первинна енергосистема; ІндН – індуктивний накопичувач; ППН – понад провідниковий накопичувач; ЕХН – електрохімічний накопичувач; АБ – акумуляторна батарея; ЄН – ємнісний накопичувач; КПЕП – конденсатор подвійного електричного прошарку (іоністори); ГЕХН – гібридний електрохімічний накопичувач; ГАН – гідроакумуючі накопичувачі; ПАН – повітроакумуючі накопичувачі.

Кожен тип накопичувачів енергії має свої характерні енергетичні показники, режими роботи, особливості конструктивного і схемотехнічного виконання, що визначають раціональні області їх застосування.

Ось перелік основних критеріїв для оцінки накопичувачів енергії на залізничному транспорті, з акцентом на інерційні накопичувачі (супермаховики):

1. питома енергоємність, вимірювана в Вт·год/кг або Дж/кг, що визначає масогабаритні показники накопичувального пристрою;
2. питома вартість накопичувального пристрою, яка обумовлює капіталовкладення;
3. довговічність, вимірювана загальним числом циклів «заряд - розряд» або терміном служби;
4. працездатність у широкому діапазоні температур;
5. простота і доступність технічного обслуговування;

6. час заряду накопичувача (вибір проводиться з урахуванням часу гальмування електротранспорту);
7. час і величина втрат при зберіганні енергії;
8. час реверсу потужності – період, за який накопичувач може перейти з режиму видачі в режим накопичення і навпаки;
9. швидкість і глибина розряду (глибина розряду дозволяє зменшити масогабаритні показники та величину «мертвого об'єму»);
10. безпека роботи;
11. високий коефіцієнт корисної дії (ККД) накопичувального пристрою.

Впровадження інерційних накопичувачів енергії (супермаховиків) у систему тягового електропостачання залізничного транспорту ставить низку задач, пов'язаних із вибором оптимального місця їх розміщення та визначенням мінімального необхідного енергетичного обсягу супермаховика. При проектуванні системи необхідно враховувати режими роботи з максимально можливим навантаженням для забезпечення надійності та ефективності накопичувача. Для цього необхідно наступне:

- В кожному конкретному випадку виділити та проаналізувати ділянку прийому надлишкової енергії.
- Встановити максимально можливу швидкість гальмування електровоза на кожній ділянці та на основі цих даних виконати тягово-енергетичні розрахунки теоретично можливої кількості рекуперованої енергії.
- Розрахувати тривалість рекуперативного гальмування і середні втрати при передачі енергії в системі електропостачання.
- Оцінити можливість проведення рекуперації на розглянутій ділянці з урахуванням ймовірності збігу режимів тяги і гальмування.
- Визначити середню кількість надлишкової енергії, що може бути рекуперована.
- Встановити умови роботи тягової мережі з урахуванням змін пропускної здатності, пов'язаної з передачею рекуперативних струмів від РкЕПС на НЕ та назад до ЕРТ у тяговому режимі.

Розташування супермаховиків може виявитися доцільним як на тягових підстанціях, так і на різних ділянках контактної мережі (рисунок 5.8).

Розглянемо можливі варіанти розміщення супермаховиків:

- на тяговій підстанції;
- в міжфідерній зоні;
- розподілене розміщення уздовж контактної мережі;
- безпосередньо на транспортному засобі.

Вибір місця розміщення в першу чергу обумовлюється економічною ефективністю і зручністю при експлуатації, а також втратами електричної енергії.

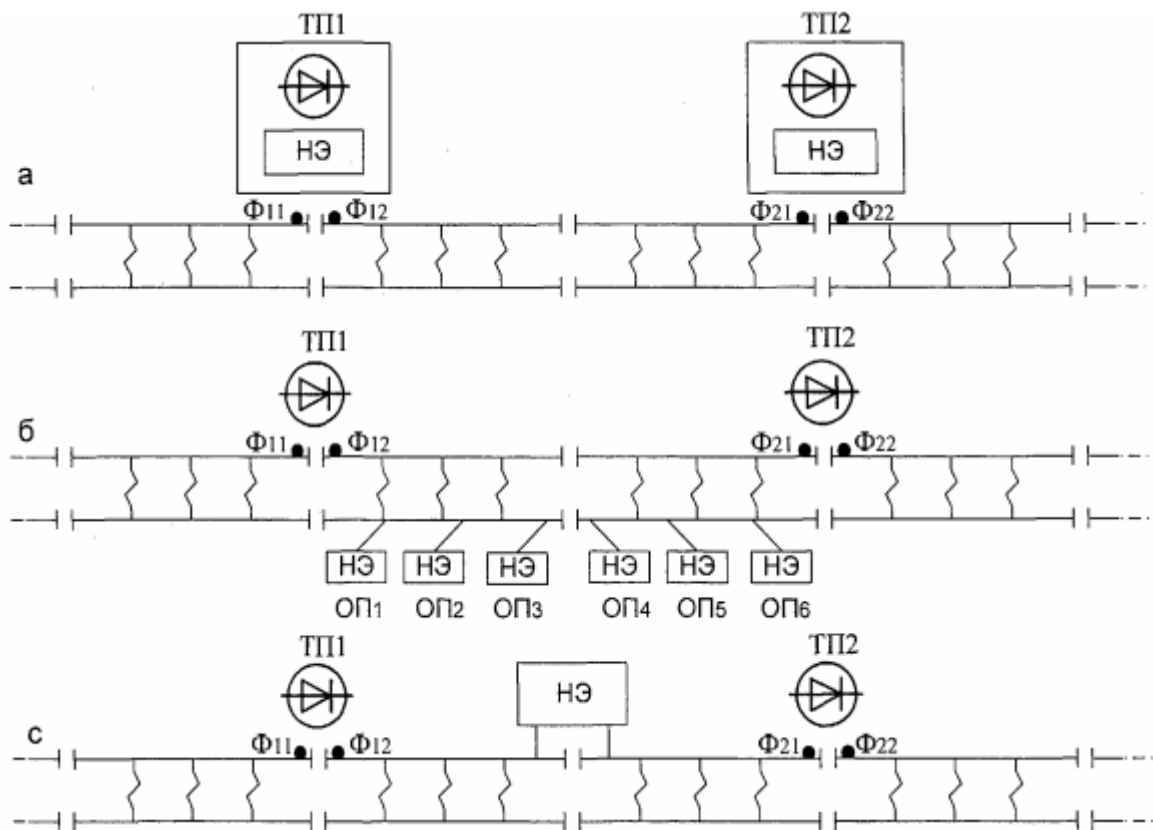


Рисунок 5.8 – Варіанти розташування накопичувачів енергії:

- а). на ТП;
- б). вздовж контактної мережі;
- в). в міжфідерній зоні.

Основними недоліками розташування накопичувачів на тягових підстанціях є великі втрати, пов'язані з передачею енергії та неможливістю

проведення рекуперативних актів при великому віддаленні електровозу від фідера.

Існує варіант розміщення накопичувачів енергії безпосередньо на електровозі, що дозволяє забезпечити певний запас автономної роботи. Проте в нашому випадку цей підхід ускладнюється через необхідність використання додаткових спеціалізованих вагонів, переобладнаних для накопичення енергії, а також через посилені вимоги щодо безпеки під час експлуатації таких систем у складі рухомого електропотяга.

Через це, враховуючи порівняльну складність реалізації, варіант із розміщенням супермаховиків безпосередньо на електровозі ми виключаємо з подальшого розгляду.

Найбільш вигідним способом рекуперації є режим, коли вся енергія, що виробляється електровозом, спрямовується до розташованого поруч супермаховика, а у фазі розряду – передається назад найближчому або тому ж електровозу, який перебуває у режимі тяги. Відповідно до цього принципу, оптимальним з точки зору мінімізації енергетичних втрат буде розміщення супермаховиків уздовж довгих залізничних ділянок, де рельєф дозволяє ефективно застосовувати рекуперативне гальмування, або там, де характерні тривалі цикли гальмування та руху.

Ефективність роботи супермаховика залежить від його конструкції — зокрема, розмірів, маси, а також від частоти та діапазону регулювання швидкості обертання. Зазвичай приймається, що зниження оборотів у два рази дозволяє повернути близько 75 % накопиченої енергії.

Вимоги вибору розмірів та маси супермаховика не створюють суттєвих обмежень при виборі накопичувального пристрою, оскільки супермаховики можуть бути розташовані в спеціально обладнаних закритих приміщеннях (рисунки 5.9) вздовж залізничної колії ділянки рекуперації.

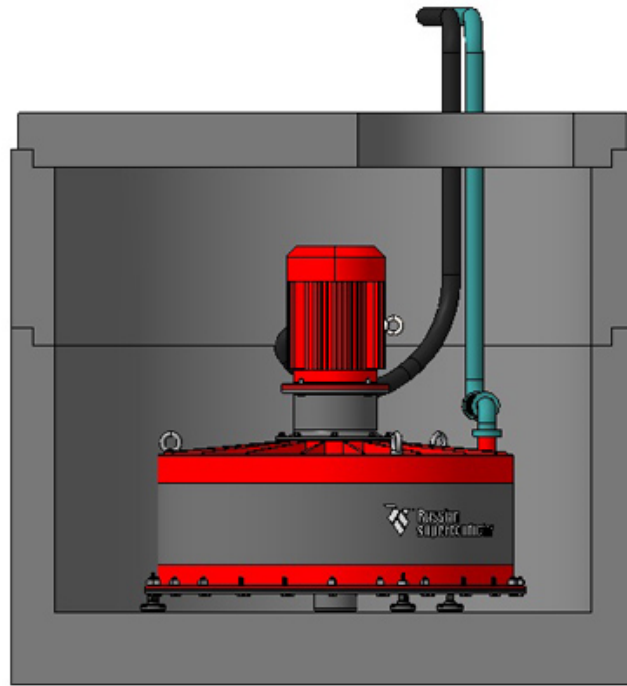


Рисунок 5.9 – Розташування супермаховика в спеціально обладнаному приміщенні

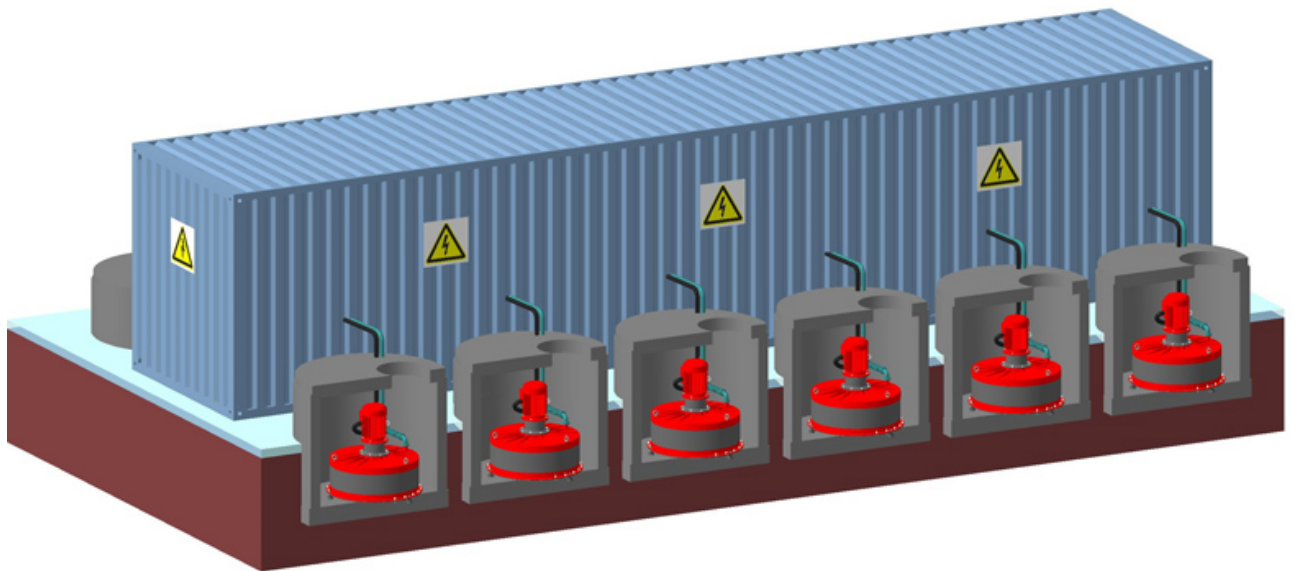


Рисунок 5.10 – Приклад обладнання «енергетичної капсули» із використанням супермаховиків

На рисунку 5.10 наведено приклад можливого розміщення кількох маховиків уздовж залізничної колії у вигляді так званої «енергетичної капсули». Кількість таких пристроїв залежить від обсягу надлишкової

енергії, що виділяється при рекуперації електровозом, яка, в свою чергу, визначається масогабаритними характеристиками потяга та його швидкістю руху.

Ця «енергетична капсула» може виконувати різні функції: слугувати керованим навантаженням, накопичувачем енергії при рекуперації, буферною ємністю, джерелом пікової потужності або динамічним резервним живленням.

Висновок: В процесі розробки та наповнення розділу була уточнена структура програмного забезпечення МСКЕ, а також описані алгоритми автоматичного управління МСКЕ і регулювання в режимі тяги з урахуванням вимог щодо забезпечення стійкості роботи системи керування.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі розроблені заходи з охорони праці під час модернізації та експлуатації системи керування електропривода електровоза ДСЗ. На електротехнічний оперативно-ремонтний персонал, який здійснює модернізацію та обслуговування синхронного двигуна, впливають такі шкідливі виробничі фактори [21, 22]:

фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил);

- фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

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 ізольованих 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 вивішується 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 високовольтної 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 замінюють 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 високовольного 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 6.1.

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

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, $^{\circ}\text{C}$	W, %	V, м/с
Теплий Холодний	Середньої важкості IIa	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

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [22]. Нормовані параметри забруднення повітря в робочій зоні наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпечності
	Максимальна разова	Середньодобова	
Оксид вуглецю		20	4
Пил нетоксичний	4	4	4

- Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця [7]. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів з очищення забруднених поверхонь. Потрібно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (менша зернистість), тим вище небезпека. Низька вологість збільшує потенційну небезпеку, це повинне прийматися в увагу під час прибирання. Планувати прибирання потрібно на час, коли устаткування вимкнене, зокрема в другу

половину дня п'ятниці або на вихідні.

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 нещасних 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 мнопія (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.

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 6.3.

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:

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

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

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки». Нормовані параметри виробничого шуму в робочій зоні наведено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні. Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно: безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі; для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

6.2.5 Виробничі вібрації

На нашому підприємстві присутня вібрація типу – За. Тобто технологічна вібрація, яка діє на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання. Нормовані параметри виробничої вібрації в робочій зоні наведено в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	$\frac{1,3^*}{108}$	$\frac{0,45}{99}$	$\frac{0,22}{93}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	-	-	-	-
Локальна вібрація	-	-	$\frac{2,8}{115}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$

*В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, $\text{м/с} \cdot 10^{-2}$, 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 ЗІЗ, а саме рукавиці, вкладиші та прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

6.2.6. Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні. Приміщення електровозного депо, де здійснюються модернізація та обслуговування електроприводів електровозів, за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі

речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами П-ІІІ (місця за межами приміщень, де зберігаються тверді горючі речовини).

Будівля депо характеризується ІІІ ступенем вогнестійкості. До ІІІ ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площад-ки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між по-верхові (у т.ч. горищні та над підва-лами	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зов-ніш-ні не-несу-чі	внут-рішні не-несучі (пере-город-ки				пли-ти, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
ІІІ	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбуршлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	3	REI 45	2	1

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 6.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 5.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських, сільськогосподарських будинків і споруд слід приймати за таблицею 5.8 (знаменник).

Таблиця 6.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

На території депо встановлено 35 порошкових вогнегасників ВП-5(8).

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 електровоза ДСЗ

Для даної системи електропривода розраховано потужність двигуна та вибрано приводний двигун, вибрані апарати захисту та керування. По результатам техніко-економічного розрахунку в якості системи електроприводу вибрано систему ПЧ-АД.

Виконано розробку схеми електричної структурної. Проаналізовано характеристики та особливості кіл керування електровоза, вибрано необхідні елементи, зокрема особлива увага приділена сучасним мікропроцесорним засобам керування автоматизованими системами. Розроблено схему електричну принципову, яка побудована на базі мікропроцесорної системи керування електровозом (МСКЕ) та бортового комп'ютера (БК).

МСКЕ в схемі електричній принциповій виконує наступні функції:

- введення сигналів завдання з контролера машиніста електровоза (КМЕ);
- введення та обробка сигналів з сенсорів струму тягових електродвигунів (ТЕД);
- введення та обробка сигналів з сенсорів швидкості (СШ);
- введення та обробка сигналів з сенсорів кута комутації;
- введення та обробка сигналів з сенсорів напруги в контактній мережі;
- введення та обробка сигналів з сенсорів напруги на ТЕД;
- формування нерегульованого кута β в режимі рекуперації;
- формування регульованого кута α_r ;
- реалізація чотирьохзонного алгоритму управління випрямно-інверторними перетворювачами;
- формування імпульсів по дванадцяти вихідним каналам управління.

Побудовані алгоритми роботи системи на базі МСКЕ із дотриманням

вимог щодо стійкості системи електроприводу в цілому та виконанням завдань регулювання в режимі тяги та рекуперації.

Описано принципи побудови системи рекуперації енергії електропотяга ДСЗ із використанням інерційних накопичувачів енергії.

Розроблено комплекс заходів та правил щодо безпечної експлуатації систем електровоза ДСЗ та його обслуговуючого персоналу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гордієнко О. І., Левченко С. П. Електропривод локомотивів і моторвагонного рухомого складу. – Дніпро: НМетАУ, 2018. – 320 с.
2. Киричек П. А., Пилипенко А. Ю. Електричні машини та електроприводи в залізничному транспорті. – К.: Транспорт України, 2015. – 248 с.
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. Коваленко С. О. Системи електроприводу залізничного транспорту. – Львів: ЛНТУ, 2021. – 280 с.
5. Кулаков В. Л., Антонов В. М. Електричний транспорт і електропривод. – Харків: УкрДАЗТ, 2017. – 350 с.
6. Потапенко О. В., Литвиненко І. В. Енергоефективні схеми електроприводу для тягового рухомого складу // Вісник технічного університету. – 2020. – № 4. – С. 45–53.
7. Мамонов С. А., Козирєв А. О. Перспективи застосування асинхронного електроприводу в електровозах // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2021. – Вип. 2. – С. 112–119.
8. El-Moursi M. S., Sharaf A. M. Electric Traction – Motive Power and Energy Supply. – Cham: Springer, 2020. – 450 p.
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 дані (1 файл: 5544 кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 192 с.

10. Powell J. Electric Railways – Power, Control and Traction. – London: IET, 2018. – 380 p.
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. ДСТУ EN 50163:2016 Залізничні застосування. Живлення тягової енергосистеми. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 48 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://profidom.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 ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОВОЗА ДСЗ В РЕЖИМАХ ТЯГИ ТА РЕКУПЕРАЦІЇ

08-24.БДР.017.00.000 ТЗ

Керівник роботи

к.т.н., доц.

Володимир БОГАЧУК

« 4 » березня 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕМСА-216

Павло СЛОБОДЯН

« 4 » березня 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки – «Модернізація системи керування електропривода електровоза ДСЗ в режимах тяги та рекуперації».

Скорочене найменування розробки – «Модернізація системи керування електропривода електровоза ДСЗ в режимах тяги та рекуперації».

Замовник – Кафедра компютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

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

3 Призначення розробки і галузь використання

Електропривод електровоза призначений для руху вагонів та перевезення вантажу.

Метою дослідження в даній роботі є модернізація системи керування електровоза змінного струму в режимах тяги та рекуперативного гальмування.

4 Вимоги до розробки

Електропривод електровоза повинен забезпечувати надійну роботу в повторно-короткочасному режимі при частих гальмуваннях та розгонах. Експлуатація здійснюється в умовах підвищеної вологості повітря, вібрації та при широких межах зміни температури навколишнього середовища.

5 Комплектація розробки

Виріб складається з перетворювального агрегату, електродвигунів та системи керування.

6 Технічні характеристики

Тип двигуна	СТА-1200
Номінальна потужність P_H , кВт	1200
Режим роботи	тривалий
Обертаючий момент M , Н м	9400
Ном./макс. частота обертання n_H , об/хв	950/2900
Номінальна напруга живлення U_H , В	1870
Номінальний струм I_H , А	450
Номінальний к.к.д. %	95,5

7 Елементна база

Трансформатор, двигун, апаратура керування і захисту, провідники, кабелі і т.п. виробництва України чи країн близького зарубіжжя.

8 Конструктивне виконання

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

9 Показники технологічності

Електропривод електровоза – трансформатор, двигун, апарати керування і захисту, провідники, кабелі тощо. Виконується на сучасній елементній базі, його монтаж, заземлення, струмопровід повинні відповідати правилам улаштування електроустановок.

10 Джерела розробки

1. Гордієнко О. І., Левченко С. П. Електропривод локомотивів і моторвагонного рухомого складу. – Дніпро: НМетАУ, 2018. – 320 с.

2. Киричек П. А., Пилипенко А. Ю. Електричні машини та електроприводи в залізничному транспорті. – К.: Транспорт України, 2015. – 248 с.
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. Коваленко С. О. Системи електроприводу залізничного транспорту. – Львів: ЛНТУ, 2021. – 280 с.
5. Кулаков В. Л., Антонов В. М. Електричний транспорт і електропривод. – Харків: УкрДАЗТ, 2017. – 350 с.
6. Потапенко О. В., Литвиненко І. В. Енергоефективні схеми електроприводу для тягового рухомого складу // Вісник технічного університету. – 2020. – № 4. – С. 45–53.

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

Живлення електропривода повинно бути виконане напругою 25000 В від тягової мережі залізничного транспорту.

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 ЕЛЕКТРОПРИВОДА
ЕЛЕКТРОВОЗА ДСЗ В РЕЖИМАХ ТЯГИ ТА РЕКУПЕРАЦІЇ

Мета, задачі та об'єкт дослідження

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

Предметом бакалаврської кваліфікаційної роботи є математичні моделі та структури, які дозволяють підвищити енергетичну ефективність тягового електропривода електровоза.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є модернізація системи керування електровоза змінного струму в режимах тяги та рекуперативного гальмування.

В процесі виконання поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Розглянути загальні експлуатаційні та технічні характеристики об'єкта дослідження.
2. Провести додаткові розрахунки для вибору потужності двигунів електровозу, виконати розрахунки та побудову навантажувальної діаграми досліджуваного електропривода.
3. Провести розрахунки економічної доцільності використання найбільш оптимального з технічної та економічної точки зору варіанту системи електропривода електровоза.
4. Вибрати найбільш оптимальний варіант системи керування електровоза типу ДСЗ з позиції використання в якості привідної системи на базі двигунів змінного струму та заміни існуючої релейної системи керування на сучасну мікропроцесорну систему. Це, з рештою, дасть змогу підвищити надійність, гнучкість налагодження та зменшити енергоспоживання системи електроприводу в цілому.
5. Розробити алгоритм управління транзисторним ВПІ та тяговим електроприводом електровоза в цілому для режимів тяги та рекуперативного гальмування.
6. Провести моделювання запропонованої системи керування з метою перевірки адекватності поведінки системи реальним фізичним та електромеханічним процесам.

Загальна характеристика, будова, особливості електровоза

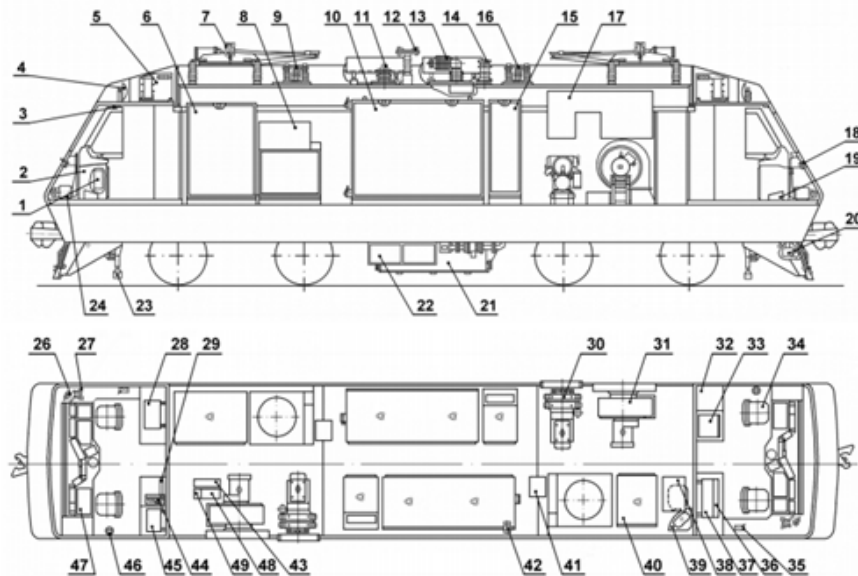


Рисунок 1.2 – Схема розташування обладнання на електровозі



Рисунок 1.1 – Електровоз змінного струму типу ДСЗ

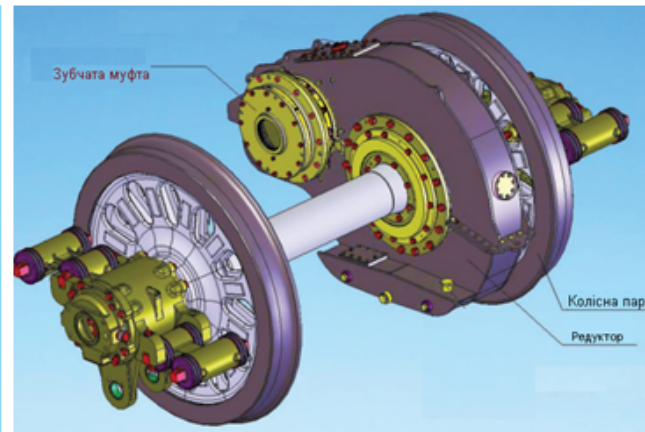
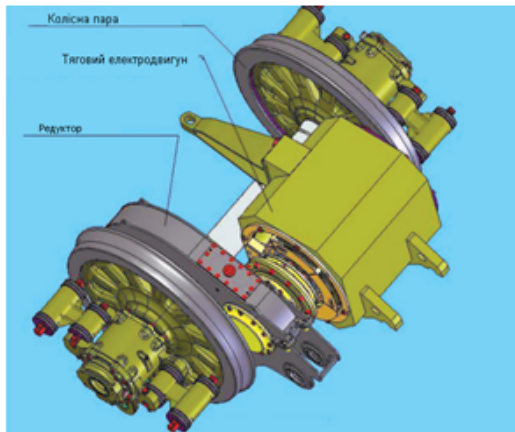


Рисунок 1.1 – Тяговий ЕП та колісна пара електровоза ДСЗ

Розрахунок потужності двигуна, побудова тахограми механізму

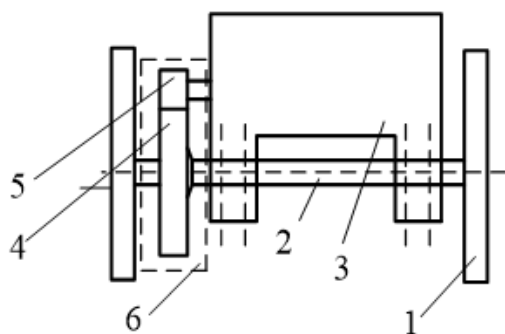


Рисунок 1.5 – Кінематична схема механізму

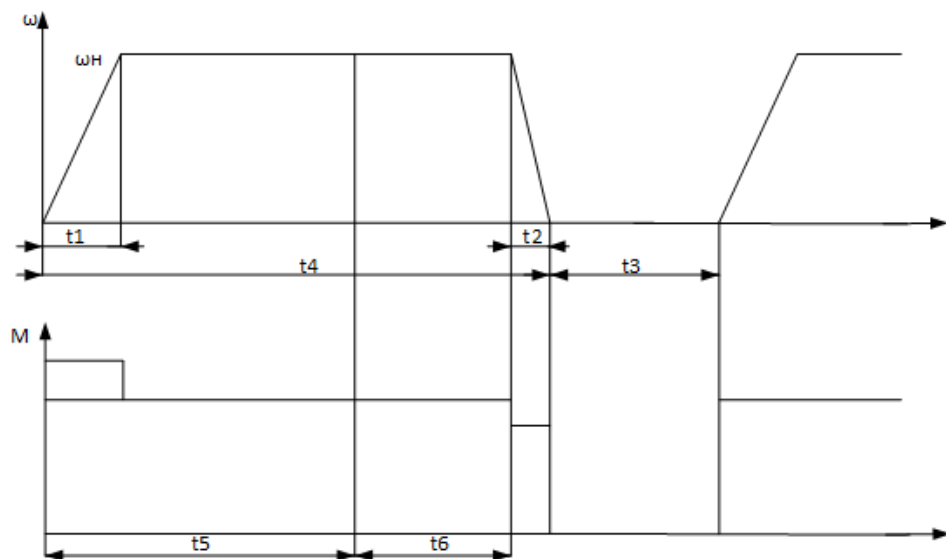


Рисунок 2.1– Тахограма швидкості та діаграма навантаження
а) тахограма швидкості б) діаграма навантаження

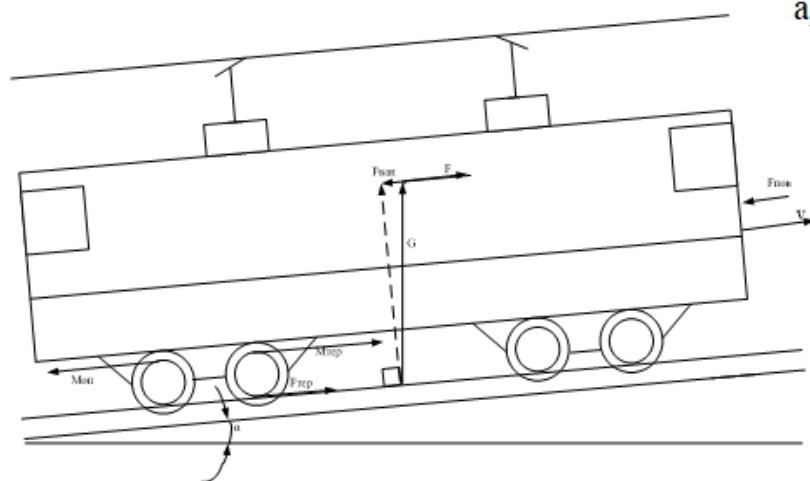


Рисунок 1.6 – Рух локомотива. До питання визначення потужності двигунів.

Техніко-економічне обґрунтування вибору СЕП

Таблиця 3.1 – Економічне порівняння варіантів систем електропривода

Показники	Тип системи електроприводу			
	ТП-ДПС	ШП-ДПС	РК-ДПС	ПЧ-АД
Потужність двигуна P_n , кВт	1200			
Вартість двигуна (Д), грн.	1307025	1307025	1307025	950486
Вартість системи керування (СК), грн.	1181821	1241337	1381337	890320
Капіталовкладення $K=D+СК$, грн.	2488846	2548362	2688362	1840806
E_d	0,05			
Амортизаційні відрахування, $Ca = E_d * K$, грн.	124442	127418	134418	92040
E_o	0,015			
Витрати на обслуговування і ремонт, $Co = E_o * K$, грн.	37333	38225	40325	27612
Вартість електроенергії mo , грн/кВт год	10,93			
Коефіцієнт завантаження k_z	0,7			
Річний час роботи T_p , год	2842			
Кількість втраченої електроенергії за рік, кВт	284321	275544	325544	265253
Витрати на електроенергію, грн	3107629	3011696	3558196	2899215
Собівартість $C = Ca + Co + C_{dw}$, грн.	3269404	3177339	3732939	3018868
Нормативний коефіцієнт економічної ефективності E_n	0,15			
Зведені витрати $Z = E_n * K + C$, грн.	3642730	3559593	4136193	3294988

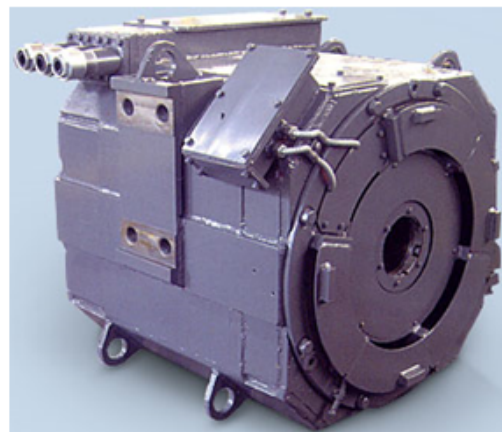


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд тягового двигуна СТА-1200

Таблиця 4.1 – Паспортні дані двигуна

Тип двигуна	СТА-1200
Номинальна потужність P_n , кВт	1200
Режим роботи	тривалий
Обертаючий момент M , Н м	9400
Частота напруги живлення F , Гц	55,9
Кількість полюсів $2P$	6
Ном./макс. частота обертання n_n , об/хв	950/2900
Номинальна напруга живлення U_n , В	1870
Номинальний струм I_n , А	450
Номинальний к.к.д. %	95,5
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$	0,88
Клас ізоляції	H
Маса двигуна без зубчатої передачі, кг	2410

Розробка схеми електричної структурної САЕП

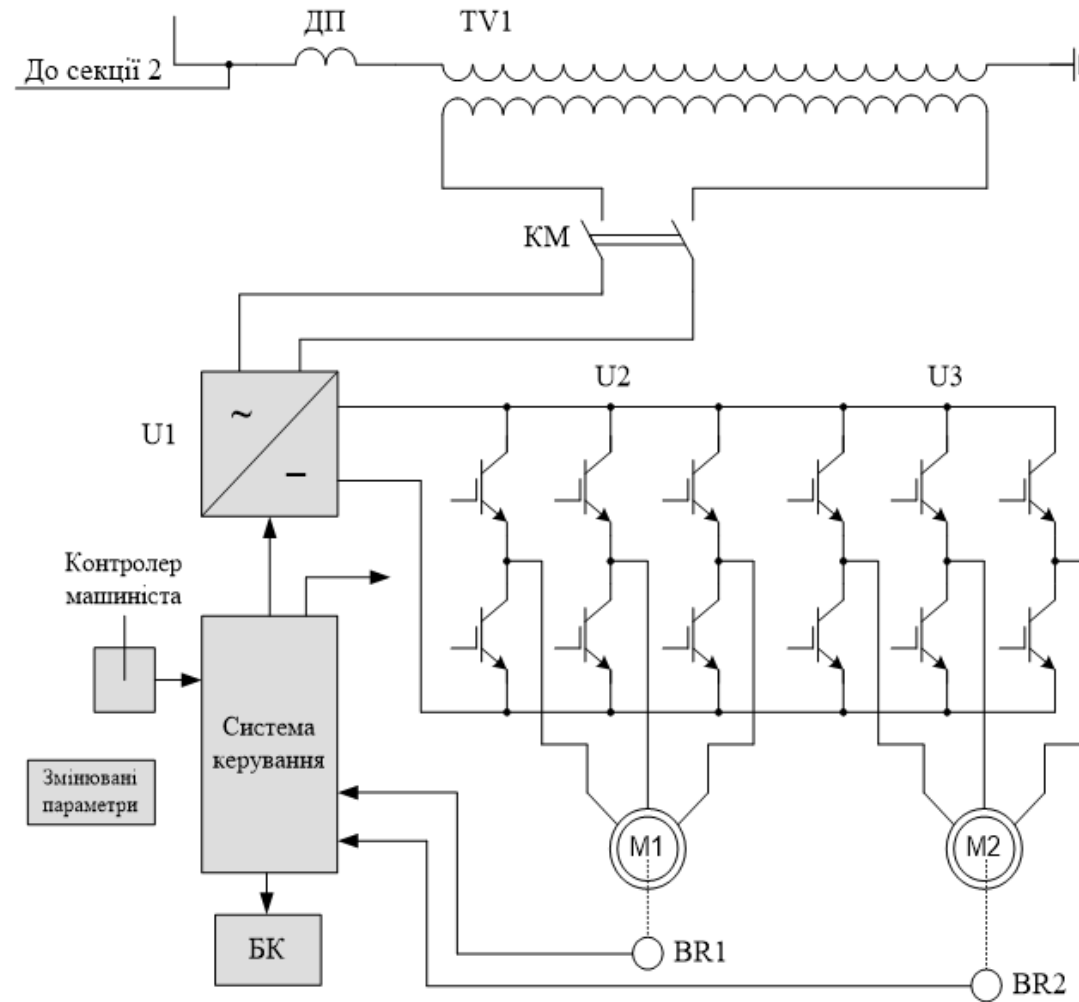


Рисунок 4.3 – Структурна схема силової частини асинхронного тягового привода шахтного електровоза

Вибір елементів силового кола системи ЕП

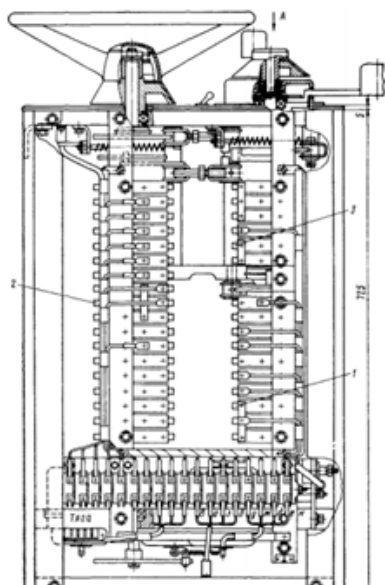


Рисунок 4.6 –
Конструкція контролера
КМЕ

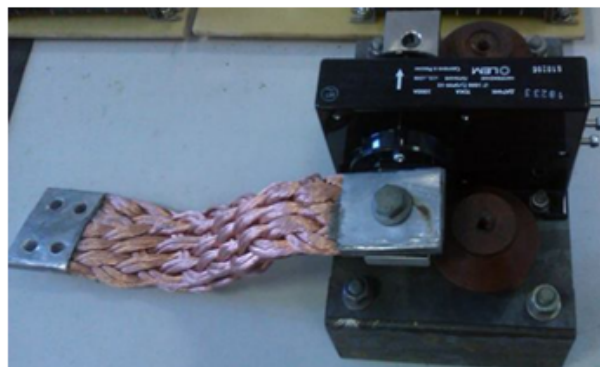


Рисунок 4.7 – Зовнішній вигляд
сенсорів струму серії LTC



Рисунок 4.11 – Зовнішній вигляд мікропроцесорного блоку
МСКЕ. Електронна плата змінного модуля блока МСКЕ

Рисунок 4.9 – Загальний вигляд блоку живлення для сенсорів швидкості

Вибір засобів керування системою ЕП

Таблиця 4.1 – Порівняльна характеристика панельних комп'ютерів

Основні характеристики	Advantech PPC-103T	Eleprom ETC.2-100	Avalue серії FPC 10W04
Дисплей	10,4 TFT	10,4 TFT	10" Wide LED
Процесор	Intel Pentium III and Intel Celeron	Intel® Atom Z510PT 1,1 ГГц (1,3 ГГц)	Intel® Atom™ N270 1.6GHz CPU
Пам'ять	До 512 MB SODIMM	До 1 ГБ наплатної пам'яті DDR2 c 400/533 MT/s	One 200-pin SODIMM Socket Supports Up to 2GB DDR2 400/ 533MHz SDRAM
I/O ports	4 serial ports: RS-232 x 3, RS-232/422/485 x 1, 1 parallel port, 2 USB, External VGA port, PS/2 mouse and keyboard, Built-in Mic-in / Line-out jacks	Подключение 3-х любых модулей (RS232, RS485, CAN, DIO, аудио (IN, OUT, MIC))), 1xGLAN, 1xPS/2, 4xUSB 1.0/2.0, 2xUSB 2.0	Line-out, Mic-in, 2 x RJ-45 (Marvell 88E8053 Gigabit Ethernet, 1 x RS-232, 1 x RS-232 or Optional RS-422/ 485, 6 x USB 2.0, 1 x DB-15, Optional USB WiFi 802.11 b/g
Максимальний дозвіл	800 x 600 @ 256 K	800x600	1024 x 600, 256K
Яскравість	230 кд/м²	400 кд/м²	200 кд/м²
Контраст	500:1	500:1	500:1
Температура експлуатації	-25 ~ 45° C	-40 ~ 70° C	-10 ~ 40° C
Габаритні розміри	342 x 265 x 92.4 мм	293x220x85	300x195x56
Вага	3.5 кг	2,3 кг	2.95

Схема електрична принципова керування ЕП

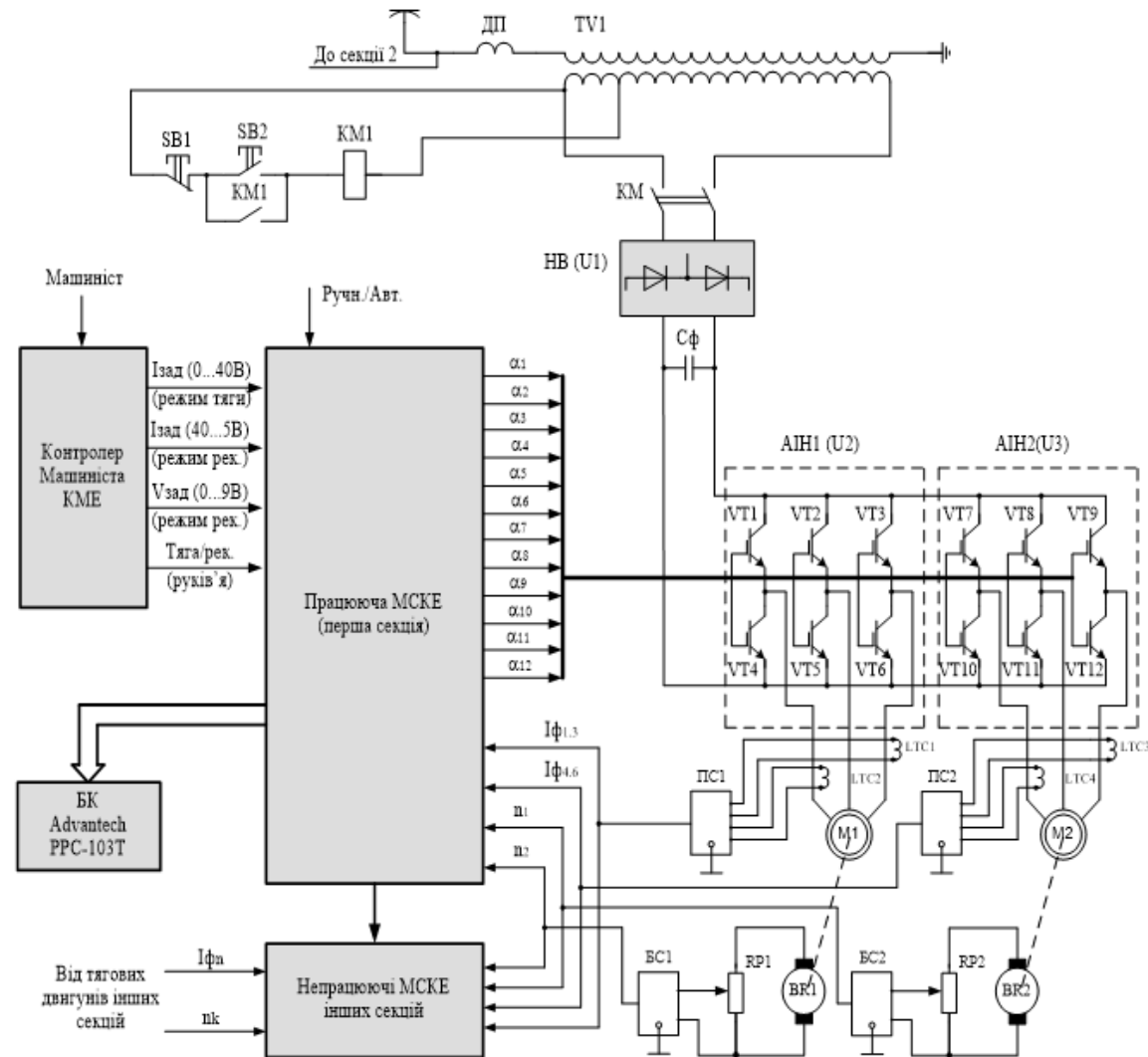
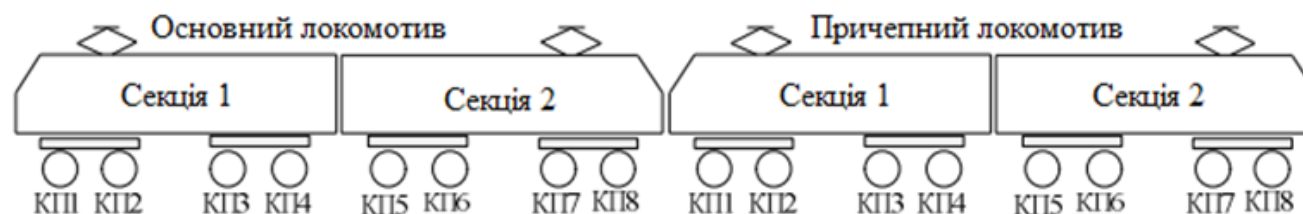


Рисунок 5.2 – Схема електрична принципова системи ЕП типу ПЧ

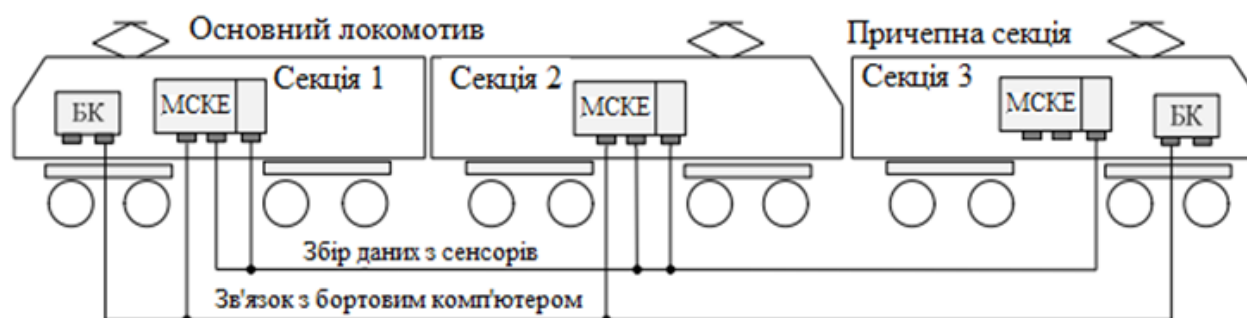
Схема спряження систем керування ЕП вагонів потягу



а. Чотирьохсекційне виконання потягу



б. Трьохсекційне виконання



в. Взаємодія МСКЕ по інтерфейсу RS-485

Рисунок 4.14 – Схема виконань потягів та взаємодії МСКЕ секцій

Алгоритми керування системою ЕП в режимах тяги та рекуперації

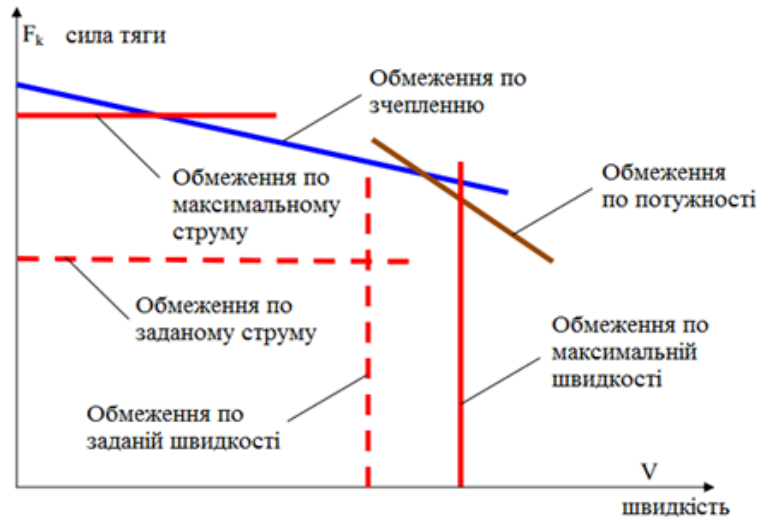


Рисунок 5.1 – Основні програмні захисти МСКЕ

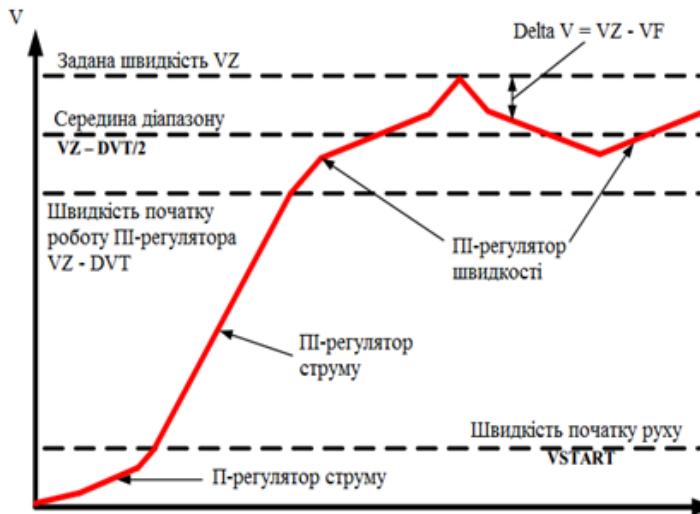


Рисунок 5.5 – Характер зміни потужності в регуляторі швидкості в режимі тяги

Рисунок 5.6 – Етапи авторегулювання в режимі рекуперації

Алгоритми керування системою ЕП в режимах тяги та рекуперації

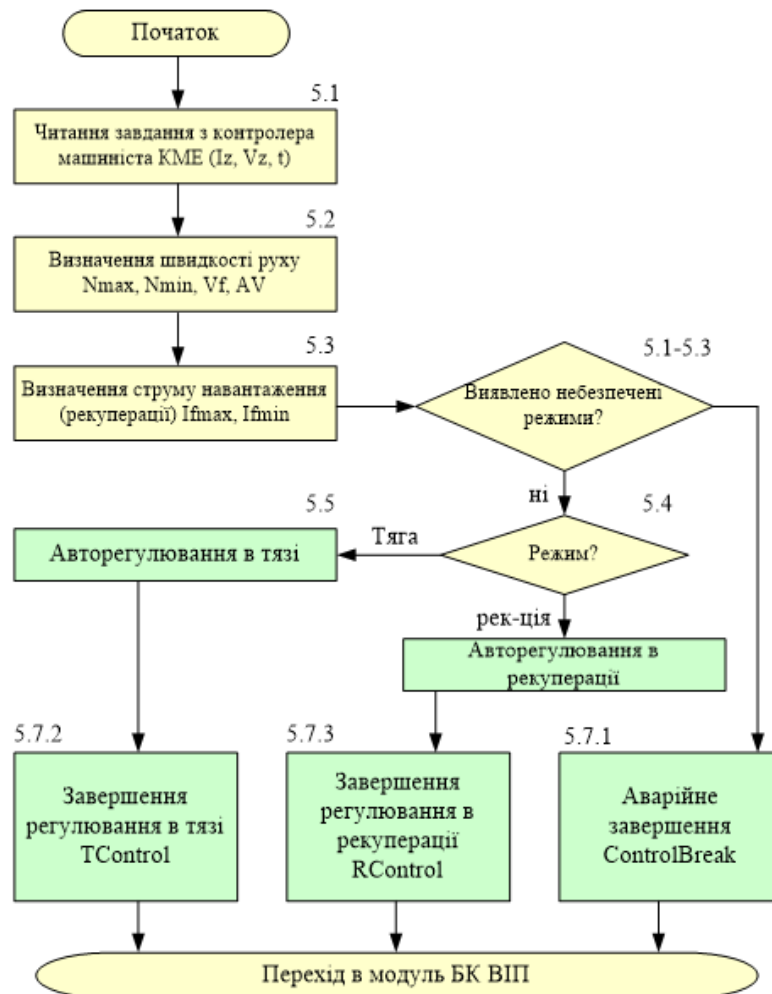


Рисунок 5.3 – Принциповий алгоритм роботи однієї ітерації

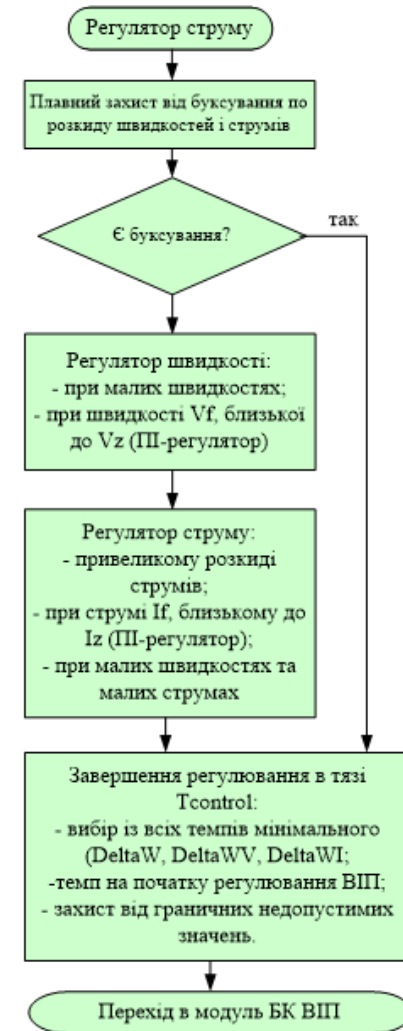


Рисунок 5.4 – Принциповий алгоритм роботи у тяговому режимі

ВИСНОВКИ

Для даної системи електропривода розраховано потужність двигуна та вибрано приводний двигун, вибрані апарати захисту та керування. По результатах техніко-економічного розрахунку в якості системи електроприводу вибрано систему ПЧ-АД.

Виконано розробку схеми електричної структурної. Проаналізовано характеристики та особливості кіл керування електровоза, вибрано необхідні елементи, зокрема особлива увага приділена сучасним мікропроцесорним засобам керування автоматизованими системами. Розроблено схему електричну принципову, яка побудована на базі мікропроцесорної системи керування електровозом (МСКЕ) та бортового комп'ютера (БК).

МСКЕ в схемі електричній принциповій виконує наступні функції:

- введення сигналів завдання з контролера машиніста електровоза (КМЕ);
- введення та обробка сигналів з сенсорів струму тягових електродвигунів (ТЕД);
- введення та обробка сигналів з сенсорів швидкості (СШ);
- введення та обробка сигналів з сенсорів кута комутації;
- введення та обробка сигналів з сенсорів напруги в контактній мережі;
- введення та обробка сигналів з сенсорів напруги на ТЕД;
- формування нерегульованого кута β в режимі рекуперації;
- формування регульованого кута α_r ;
- реалізація чотирьохзонного алгоритму управління випрямно-інверторними перетворювачами;
- формування імпульсів по дванадцяти вихідним каналам управління.

Побудовані алгоритми роботи системи на базі МСКЕ із дотриманням вимог щодо стійкості системи електроприводу в цілому та виконанням завдань регулювання в режимі тяги та рекуперації.

Описано принципи побудови системи рекуперації енергії електропотяга ДСЗ із використанням інерційних накопичувачів енергії.

Розроблено комплекс заходів та правил щодо безпечної експлуатації систем електровоза ДСЗ та його обслуговуючого персоналу.

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Модернізація системи керування електропривода електровоза ДСЗ в режимах тяги та рекуперації

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

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

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 9,47%

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.

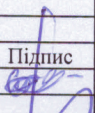
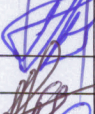
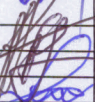
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Слободян П.Ю.

(прізвище, ініціали)

					08-24.БДР.017.00.000				
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Модернізація системи керування електропривода електровоза ДСЗ в режимах тяги та рекуперації	Літ.		Маса	Масштаб
Розробив		Слободян П.Ю.		20.05					
Перевірив		Богачук В.В.		20.05					
Т конр.									
						Аркуш		Аркушів	
		Баденко		20.06		ВНТУ, гр. ЕМСА-216			
Норм.кон.		Захарук		23.06					
Затверд.		Мошноріз М.М.		23.06					