

Міністерство освіти і науки України
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації,
робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова

**Кафедра автоматизації технологічних, електромеханічних і
робототехнічних систем**



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

**на тему «ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ
ТЯГОВИМ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ ЕЛЕКТРОПОЇЗДА З
ОБМЕЖЕННЯМ СТРУМІВ ПУСКУ»**

Здобувач СВО «Бакалавр»: Дарієнко Віталій Вікторович
Студент групи АЕМт-20

Керівник: Москалюк Андрій Юрійович,
к.т.н., доцент

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 16.06.2026 р., протокол № 8.

В.о. завідувач(ка) кафедри АТЕіРС
(назва кафедри)

(підпис)

Олексій Жигайло
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут: *Комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім.*

П.М.Платонова

Кафедра: *Електромеханіки та мехатроніки*

Ступень ВО: *бакалавр*

Галузь знань: *14 – Електрична інженерія*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

Освітня програма: *Екоенергетика та інтелектуальна електромеханіка*

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри ЕтаМ

Осадчук П.І.

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

здобувача СВО «Бакалавр» АЕМт – 20 Дарієнко Віталій Вікторович

1. Тема роботи: «Проектування систем частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда з обмеження струмів пуску»

Керівник роботи: Москалюк Андрій Юрійович, к.т.н., доцент.

Затверджено наказом ОНТУ № 641-03 від 21.12.2025 р.

2. Срок подання студентом роботи: 15.06.2026 р.

3. Вхідні дані до проекту: тягова сила локомотива $F_{\text{тяг}}=226$ кН, кількість тягових двигунів $z=4$, діаметр колеса $D_k=1,25$ м, передатне число редуктора $i_p=3.5$, номінальний момент двигуна $M_n \approx 10.07$ М, номінальна частота живлення $f_n=56.9$ Гц, кількість пар полюсів $p_n=3$, номінальне ковзання $s_n = 0.01$, номінальна напруга $U_n=1080$ В, номінальний струм $I_n = 465.5731$ А. Для моделювання режимів руху прийнято масу локомотива 120 т і масу рухомого складу з вагонами 700 т. Визначити параметри Т-подібної схеми заміщення двигуна, індуктивності та допоміжні коефіцієнти математичної моделі, для дослідження режимів пуску, розгону та обмеження струмів.

4. Зміст розрахунково-конструкторської частини пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз особливостей роботи тягового електроприводу електропоїзда та існуючих систем керування тяговими двигунами; розрахунок основних параметрів тягового асинхронного двигуна і потужності електроприводу; розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна; моделювання електроприводу локомотива; дослідження режимів обмеження струмів пуску; техніко-економічне обґрунтування, охорона праці

5. Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації:

1. Титульний слайд. 2. Актуальність теми, об'єкт проектування, мета і завдання роботи. 3. аналіз особливостей роботи тягового електроприводу електропоїзда. 4. Розгляд існуючих систем керування тяговими двигунами; 5. Розрахунок основних параметрів тягового асинхронного двигуна і потужності електроприводу; 6. розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна; 7. моделювання електроприводу локомотива; 8. дослідження режимів обмеження струмів пуску; 9. техніко-економічне обґрунтування, 10. охорона праці. 11. Висновки.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Москалюк А.Ю., доц.		
Економічна частина	Москалюк А.Ю., доц.		

7. Дата видачі завдання: 21.12.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ
ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим
1	1. Загальна характеристика роботи: вибір об'єкта проектування, опис і аналіз роботи тягового електроприводу електропоїзда та його основного обладнання. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.	05.03.2026	
2	2. Аналіз роботи тягового електроприводу електропоїзда. Розгляд основних елементів конструкції тягового приводу, аналіз електродвигунів електропоїздів із зосередженням уваги на тяговому асинхронному двигуні та умовах його експлуатації.	10.04.2026	
3	3. Розрахунково-конструкторська частина тягового електроприводу електропоїзда. Розрахунок механічної характеристики тягового асинхронного двигуна, розрахунок потужності електроприводу та перевірка двигуна за тепловим перевантаженням.	10.05.2026	
4	4. Дослідження динамічних режимів роботи тягового асинхронного електроприводу електропоїзда на ЕОМ: розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна в MATLAB, розробка імітаційної моделі електроприводу локомотива та аналіз режимів обмеження струмів пуску.	25.05.2026	
5	5. Економічна частина: розрахунок економічної ефективності від впровадження системи частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда з обмеженням струмів пуску.	13.06.2026	
6	6. Частина з охорони праці: розгляд питань організації охорони праці під час експлуатації тягового електроприводу електропоїзда, електро- та пожежної безпеки, розрахунок заземлюючого пристрою.	15.06.2026	
7	Перевірка роботи на плагіат. Рецензування роботи	19.06.2026	
8	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра.	23.06.2026	

Здобувач: Дарієнко В.В. _____

Керівник: Москалюк А.Ю. _____

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ. Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник _____ Дарієнко В.В.

Реферат

Дарієнко В.В. «Проектування систем частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда з обмеженням струмів пуску».

Кваліфікаційна робота бакалавра. – Одеса: ОНТУ, 2026. – 92 с. Бібліогр.: 16 найм. Слайдів презентаційної частини – 17.

У кваліфікаційній роботі розглянуто систему частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда з обмеженням струмів пуску; виконано аналіз тягового електроприводу, розраховано параметри двигуна і Т-подібної схеми заміщення, змодельовано режими пуску та розгону в MATLAB Simulink. У заключній частині наведено техніко-економічне обґрунтування та питання охорони праці.

Ключові слова: асинхронний двигун, електропоїзд, тяговий електропривод, обмеження струмів пуску.

Referee

Darienko V.V. “DESIGN OF FREQUENCY CONTROL SYSTEMS FOR THE TRACTION INDUCTION MOTOR OF AN ELECTRIC TRAIN WITH STARTING CURRENT LIMITATION”. Bachelor’s qualification thesis. – Odesa: ONTU, 2026. – 92 p. Bibliography: 19 references. Presentation slides – 14.

The bachelor’s qualification thesis considers a frequency control system for the traction induction motor of an electric train with starting current limitation; the traction electric drive is analyzed, the motor and T-shaped equivalent circuit parameters are calculated, and starting and acceleration modes are simulated in MATLAB Simulink. The final part presents technical and economic justification and occupational safety issues.

Keywords: induction motor, electric train, traction electric drive, starting current limitation, electromechanical processes.

ЗМІСТ

	стр.
ВСТУП	8
1 ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ ПРИ РОБОТІ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОПОЇЗДА	9
1.1 Загальна характеристика електропоїзда як об'єкта електропривода	9
1.2 Особливості роботи тягового асинхронного двигуна	14
1.3 Принципи частотного керування та обмеження струмів пуску	17
Висновки до розділу 1	23
2 АНАЛІЗ РОБОТИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДА	25
2.1 Структура та основні елементи тягового електроприводу	32
2.2 Огляд систем керування тяговими двигунами	30
2.3 Аналіз алгоритмів керування	37
Висновки до розділу 2	46
3 РОЗРАХУНКИ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ ЕЛЕКТРОПОЇЗДА	47
3.1 Розрахунок основних параметрів тягового асинхронного двигуна	47
3.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна	50
3.3 Моделювання електроприводу локомотива	56
3.4 Розрахунок режимів обмеження струмів пуску	61
Висновки до розділу 3	69

					КРБ.АТЕіРС.141.641-03.2.1			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Дарієнко В.В.				Проектування систем частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда з обмеженням струмів пуску	Літ	Аркуш	Аркушів
Керівни	Москалюк А.Ю						5	94
						ОНТУ, АЕМт - 20		
Консульт.								
Зав.кафедри	Жигайло О.М.							

4. ОХОРОНА ПРАЦІ	72
4.1 Організація та управління охороною праці	74
4.2 Аналіз умов праці на робочих місцях, електро- та пожежної безпеки	75
4.3 Розрахунок захисного занулення	75
4.4 Заходи з охорони праці	79
4.5. Висновки до розділу 4	81
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	81
5.1 Техніко-економічне провадження системи частотного керування	81
5.2 Визначення капітальних витрат на впровадження системи	84
5.3 Розрахунок експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів	85
5.4 Розрахунок економічної ефективності та строку окупності	86
5.5. Висновки до розділу 5	87
ВИСНОВКИ	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	90

ВСТУП

Сучасний розвиток залізничного транспорту пов'язаний із підвищенням ефективності тягових електроприводів. Одним із перспективних напрямів є застосування тягових асинхронних двигунів у поєднанні з системами частотного керування. Такі системи дають можливість плавно регулювати швидкість, зменшувати динамічні навантаження на механічну передачу, покращувати енергетичні показники та підвищувати ресурс обладнання. Водночас у пускових режимах виникає проблема значних струмових перевантажень, які негативно впливають на обмотки двигуна, силовий перетворювач і елементи живильної мережі. Тому проектування систем частотного керування з обмеженням струмів пуску є актуальним завданням.

Актуальність теми зумовлена роботою електродвигунів в умовах частих пусків, розгонів та зупинках. Для сучасного рухомого складу важливими є обмеження пускових струмів для забезпечення плавності ходу.

Об'єктом дослідження є тяговий асинхронний електропривод електропоїзда.

Предметом дослідження є система частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда з обмеженням струмів пуску.

Метою роботи є проектування системи частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда, яка забезпечує обмеження струмів пуску при збереженні необхідного тягового моменту.

Для досягнення цього був здійснено аналіз особливостей роботи тягового електроприводу електропоїзда; розрахунок основних параметрів тягового двигунів; визначення параметрів Т-подібної схеми заміщення; змодельовано режими обмеження струмів пуску. Крім того здійснено техніко-економічне обґрунтування запропонованого рішення та розгляд питань охорони праці.

Практичне значення роботи полягає в тому, що результати можуть бути використані при дослідженні та вдосконаленні систем керування тяговими асинхронними електроприводами електропоїздів.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

1 ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ ПРИ РОБОТІ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОПОЇЗДА

1.1 Загальна характеристика електропоїзда як об'єкта електропривода.

Залізничний електричний транспорт представлений насамперед електровозами та електропоїздами, які широко застосовуються для перевезення пасажирів і вантажів на електрифікованих ділянках залізниць. Електровоз є тяговою одиницею, призначеною для ведення окремих вагонів або составів, тоді як електропоїзд являє собою самохідний рухомий склад, у якому тягове обладнання розміщується безпосередньо на моторних вагонах. Обидва види рухомого складу працюють за спільним принципом, що полягає у перетворенні електричної енергії, отриманої від контактної мережі, у механічну енергію руху.

Електровози, як правило, експлуатуються у режимах тривалого тягового навантаження та забезпечують переміщення составів великої маси на значні відстані. Для них важливими є висока сила тяги, надійність та здатність працювати в широкому діапазоні швидкостей. Електропоїзди, на відміну від електровозів, частіше використовуються на маршрутах із великою кількістю зупинок, особливо у приміському та міському сполученні. Саме тому для них особливого значення набувають плавний пуск, інтенсивний розгін, обмеження пускових струмів, стійкість роботи в повторно-короткочасних режимах і підвищена енергоефективність.

Електропоїзд являє собою складну технічну систему, у якій перетворення електричної енергії в механічну безпосередньо пов'язане із забезпеченням руху в заданих експлуатаційних режимах. На відміну від багатьох стаціонарних промислових установок, тягова система поїзда працює в умовах постійної зміни навантаження. Це навантаження визначається масою состава, профілем колії, режимами розгону і гальмування, станом контактної мережі та вимогами до плавності руху.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однією з основних особливостей електропоїзда є динамічний характер роботи. У процесі експлуатації він багаторазово виконує пуск, розгін, рух із сталою швидкістю, вибіг, уповільнення та зупинку. У кожному з цих режимів до тягової системи висуваються різні вимоги. Під час пуску необхідно забезпечити достатній електромагнітний момент для рушання з місця та подальшого розгону, але при цьому не допустити надмірного зростання струму, яке може викликати перевантаження двигуна, силового перетворювача та елементів мережі живлення. Саме тому обмеження струмів пуску є одним із найважливіших завдань системи керування.

Ще однією характерною рисою є значна інерційність. Велика маса рухомого складу потребує створення істотного тягового моменту в моменти рушання і розгону. Водночас часті зупинки на маршруті вимагають стабільності та повторюваності перехідних процесів. Через це до системи керування ставляться вимоги щодо швидкодії, точності регулювання, надійності та стійкості роботи за різних умов експлуатації.

До складу тягової системи входять джерело живлення, силовий перетворювач, тяговий електродвигун, передавальний механізм, колісна пара та система автоматичного керування. Узгоджена робота цих елементів визначає тягово-динамічні властивості поїзда. У сучасних умовах найбільш перспективним є застосування асинхронних тягових двигунів у поєднанні з перетворювачами частоти. Такий підхід дозволяє плавно регулювати швидкість, момент і струм двигуна, підвищувати енергоефективність та знижувати динамічні навантаження на механічну частину.

Важливою вимогою до тягового обладнання є безпека та безвідмовність роботи. Будь-які порушення у функціонуванні привода можуть призвести до зниження надійності перевезень, збільшення експлуатаційних витрат і прискореного зношування обладнання. Тому система керування повинна забезпечувати стабільну роботу двигуна в широкому діапазоні швидкостей і

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навантажень, а також підтримувати допустимі значення струму, напруги та температури.

Не менш важливою є енергоефективність. Значна частина витрат під час експлуатації електропоїзда пов'язана саме зі споживанням електроенергії. Використання частотного керування дозволяє реалізувати раціональні закони пуску та розгону, за яких струм двигуна не перевищує допустимих значень, а енергетичні втрати зменшуються. Крім того, зниження пускових струмів позитивно впливає на ресурс силового обладнання та підвищує загальну надійність тягової системи.

Отже, електропоїзд є складною динамічною системою, для якої визначальними є тягові характеристики, плавність регулювання швидкості, надійність, енергоефективність та обмеження струмів пуску. Це обґрунтовує доцільність застосування систем частотного керування тяговими асинхронними двигунами та визначає актуальність їх проектування і дослідження.

Характеристики електровозів та електропоїздів на прикладі восьмиосного двосекційного електровоза змінного струму ВЛ80 всіх різновидів, обладнані колекторними тяговими електродвигунами, є основними вантажними локомотивами залізничних ліній, електрифікованих на змінному струмі напругою 25 кВ 50 Гц., а починаючи з 1964 г.— з кремнієвими випрямлячами (електровози ВЛ80К).

Електровози ВЛ80Т. Механічна частина електровоза виконана у вигляді двох однакових чотиривісних секцій з незчленованими візками. У кузовах секцій електровоза зварної конструкції широко використані гнуті профілі; по кінцях кузовів встановлені автозчеплення СА-3 з фрикційними апаратами.

Тягові електродвигуни спираються однією стороною на шкворневі бруси візків за допомогою підвіски з гумовими шайбами, а іншою — через моторно-осьові підшипники на осі колісних пар. Зубчата передача від тягового електродвигуна до колісних пар двостороння, жорстка, косозуба. На

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шкворневих брусах кожного візка встановлено два гальмівні циліндри діаметром 10" (254 мм), які за допомогою передачі важеля забезпечують двостороннє натиснення гальмівних колодок на колісні пари. Діаметр коліс при нових бандажах 1250 мм. Електровоз обладнаний розподільниками повітря № 270, кранами машиніста № 394 і кранами допоміжного гальма № 254.

Для перетворення змінного струму з номінальною напругою 25 кВ в постійний струм нижчої напруги на кожній секції електровоза встановлені один тяговий трансформатор ОДЦЭ-5000/25Б і дві випрямні установки.

Трансформатори мають три обмотки:

первинну, з'єднану через струмоприймач з контактним дротом,

тягову для живлення ТЕД і обмотку власних потреб для живлення електродвигунів допоміжних машин і опалювальних печей кабін машиніста.

Тягова обмотка складається з двох нерегульованих частин і двох регульованих; останні розділені на чотири секції. Сердечник трансформатора виконаний з листової сталі з вертикальним розташуванням стержнів, на яких розміщені обмотки. Сердечник разом з обмотками поміщений в бак восьмигранної форми, заповнений маслом. Для відведення тепла, що виділяється обмотками і сердечником, масло насосом проганяється через охолоджувачі (радіатори), встановлені зовні масляного бака трансформатора і охолоджувані повітрям.

Насос трансформатора приводиться трифазним асинхронним електродвигуном 4ТТ-63/10 потужністю 2,2 кВт при напрузі 380 В. Електродвигун не має сальника і разом з насосом вбудований в бак трансформатора (занурений двигун).

Маса трансформатора 8000 кг Коефіцієнт корисної дії трансформатора при номінальній потужності близько 98 %.

Живлення кожної пари паралельно з'єднаних тягових електродвигунів здійснюється через свою випрямну установку ВУК-4000Т. Випрямна

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

установка укомплектована кремнієвими вентилями ВЛ-200-8, розрахованими на номінальний прямий струм 200 А і зворотну напругу не менше 800В. У кожному плечі випрямного моста є 12 паралельних ланцюгів з чотирьох послідовно включених вентилів в кожній, тобто всього в плечі 48 вентилів, в мосту — 192, а в чотирьох випрямних установках електровоза 768. Маса випрямної установки 450 кг, коефіцієнт корисної дії не менше 98 %.

На електровозі встановлено вісім шестиполюсних тягових електродвигунів НБ-418К6 з компенсаційною обмоткою. Остов електродвигуна циліндрової форми. Якір має петлеву обмотку із зрівняльними з'єднаннями. Котушки головних і додаткових полюсів мають ізоляцію класу Н; котушки якоря і компенсаційної обмотки — класу В, а починаючи з середини 70-х років — класу Р. Підшипники якоря — роликові, моторно-осьові — ковзаючі з постійним рівнем мастила.

Кількість охолоджуваного повітря, що проганяється через тяговий електродвигун, 105 м³/хв. Максимальна частота обертання якоря 2040 об/год. Маса тягового електродвигуна НБ-418К6 без зубчатої передачі 4325 кг

Швидкість руху електровоза регулюється зміною напруги, що підводиться до тягових електродвигунів. Це досягається перемиканням під навантаженням секцій тягової обмотки трансформатора і стрічним або узгодженим з'єднанням нерегульованих і регульованих частин цієї обмотки. Перемикання виконуються головним контролером ЭКТ-8Ж. Цей контролер має 4 контакти з дугогасінням і 30 контактів без дугогасіння. Їх замикання і розмикання здійснюються кулачковим валом, який повертається серводвигуном постійного струму 50 В. Всього головний контролер має 39 позицій: нульову, 33 пускових (1 —17 і 18—33) і 5 проміжних (одна між нульовою і 1-ою і чотири між 17-ою і 18-ою). Ходовими позиціями є 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29 і 33-а; на них плечі тягової обмотки симетричні, і падіння напруги на перехідних реакторах мінімальне. Всі позиції, окрім проміжних, є фіксованими. Для отримання трьох ступенів ослаблення збудження тягових

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електродвигунів паралельно їх обмоткам збудження за допомогою електропневматичних контакторів приєднуються резистори, послідовно яким включені індуктивні шунти. Струм в обмотках збудження складає на 1-му ступені ослаблення збудження 70 % від струму якоря, на 2-му ступені — 52 % і на 3-му ступені — 43%.

У режимі реостатного гальмування обмотки збудження тягових електродвигунів відключаються від ланцюга якорів, з'єднуються всі вісім послідовно і отримують живлення через спеціальну випрямну установку від двох секцій тягової обмотки трансформатора; застосування в установці тиристорів дозволяє здійснювати плавне регулювання напруги на виході і відповідно струму збудження. Якорі всіх тягових електродвигунів підключаються до індивідуальних гальмівних резисторів, тобто в режимі реостатного гальмування електродвигуни працюють як генератори з незалежним збудженням. Електровози обладнані системою автоматичного регулювання гальмівної сили, що дозволяє підтримувати задану швидкість на спусках і обмежувати гальмівну силу залежно від потужності гальмівних резисторів, зчеплення, струму збудження і умов комутації тягових електродвигунів.

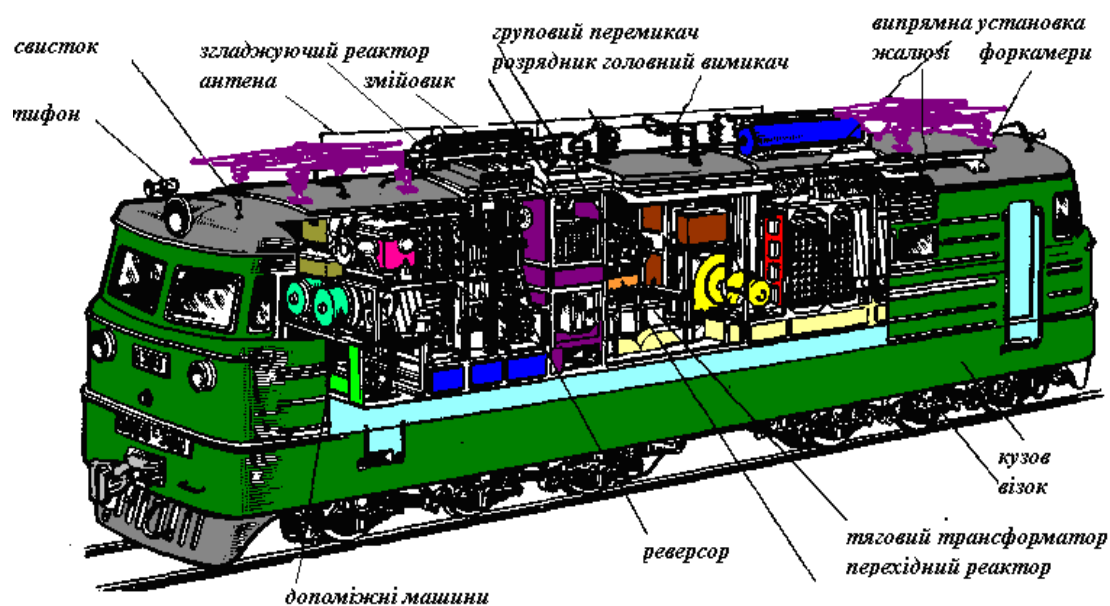


Рис. 2.3 Розміщення обладнання на шестивісному електровозі змінного струму

На кожній секції встановлений струмоприймач ТЛ13У або ТЛ14М. Для відключення машиністом мережевої обмотки трансформатора від струмоприймачів, а також її автоматичного відключення при коротких замиканнях і перевантаженнях електроустаткування служить головний повітряний однополюсний вимикач ВОВ-25-4М, розрахований на номінальний струм 400 А, граничний струм відключення 10000 А, потужність відключення 250 МВ-А. У силових ланцюгах тягових електродвигунів є реле перевантаження, яке при струмі 1500 А через проміжне реле вимикає головний вимикач.

1.2 Особливості роботи тягового асинхронного двигуна.

Тяговий асинхронний двигун є одним із основних елементів сучасного електропоїзда, оскільки саме він забезпечує перетворення електричної енергії на механічну енергію обертання колісних пар. У порівнянні з іншими типами тягових машин асинхронний двигун відзначається відносною простотою конструкції, відсутністю колекторно-щіткового вузла, підвищеною надійністю та зменшеними витратами на технічне обслуговування. Саме ці переваги зумовили його широке застосування в сучасному рухомому складі.

Особливістю роботи тягового асинхронного двигуна є те, що його ефективне функціонування безпосередньо пов'язане з використанням системи частотного керування. Швидкість обертання такого двигуна визначається частотою напруги живлення, тому для забезпечення плавного регулювання швидкості та моменту необхідно застосовувати перетворювач частоти. Зміною частоти та рівня напруги живлення можна реалізувати різні режими роботи двигуна, зокрема пуск, розгін, усталений рух, зниження швидкості та електричне гальмування.

Для тягового режиму характерною є робота в умовах частої зміни навантаження. Під час пуску електропоїзда двигун повинен розвивати підвищений електромагнітний момент, достатній для рушання з місця та подолання сил опору руху. У цей момент у колах двигуна можуть виникати

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значні струми, які при відсутності належного регулювання здатні перевищувати допустимі значення. Надмірні пускові струми призводять до додаткового нагрівання обмоток, збільшення навантаження на силовий перетворювач та погіршення умов роботи всієї тягової системи. Тому для таких двигунів особливо важливо забезпечити обмеження струму на етапі пуску.

Суттєвою особливістю тягового асинхронного двигуна є його робота в повторно-короткочасних і перехідних режимах. Для електропоїздів характерні часті розгони, уповільнення та зупинки, тому двигун постійно переходить з одного режиму в інший. У таких умовах важливого значення набувають динамічні показники, зокрема швидкість наростання моменту, стійкість електромеханічних процесів та допустимий рівень коливань струму і швидкості. Від якості налаштування системи керування залежить плавність руху поїзда, навантаження на механічні вузли та комфорт пасажирів.

Не менш важливою є теплова напруженість роботи. Тяговий асинхронний двигун під час пуску і розгону працює з підвищеним струмом, що супроводжується зростанням втрат енергії та нагріванням обмоток. Якщо пускові режими повторюються часто, теплова дія стає ще більш відчутною. Саме тому під час проектування системи керування необхідно враховувати не лише тягові можливості двигуна, а й умови його охолодження, допустимі перевантаження та тривалість роботи в окремих режимах. Отже, тяговий асинхронний двигун працює в складних і змінних умовах, для яких характерні часті пуски, значні перевантаження, широкий діапазон швидкостей і підвищені вимоги до надійності. Його нормальне функціонування можливе лише за умови використання сучасної системи керування, здатної забезпечити потрібний тяговий момент, стабільне регулювання швидкості та обмеження струмів пуску. Саме ці особливості визначають доцільність детального розгляду принципів частотного керування в наступному підрозділі.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тягові електродвигуни відрізняються від звичайних ЕД високої потужності способами закріплення та обмеженому просторі для їх розміщення [1]. Через це вони мають дещо специфічну конструкцію – обмежені розміри, багатогранні станини та спеціальні кріплення. Міські та залізничні тягові двигуни працюють у суворих погодних умовах, у вологому та запиленому повітрі. На рисунку 1.3 можна побачити розміщення ТЕД.

Тягові електродвигуни, на відміну від двигунів загального призначення, також працюють в різних режимах (короткочасний, повторно-короткочасний з частими запусками), що супроводжується великим діапазоном зміни швидкості обертання і струму навантаження. При відправленні з місця струм може перевищувати номінальний у 2 рази. Під час роботи тягових двигунів виникають часті механічні, теплові та електричні перевантаження, удари та поштовхи. Тому при розробці їх конструкцій вони забезпечують підвищену електричну та механічну міцність деталей і вузлів, теплостійку і вологостійку ізоляцію деталей і обмоток, а також стабільну комутацію двигунів. Крім того, тягові електродвигуни, що призначені для шахтних електровозів, повинні відповідати вимогам, що стосуються вибухобезпечного електрообладнання.

Тягові двигуни класифікуються по виду струму, типу двигуна, типу підвіски, способу живлення, конструкції, режиму роботи, ступеню захисту, кліматичному виконанню та способу охолодження. Ці двигуни можуть бути як універсальними, тобто використовуватись на різних видах електротранспорту, так і спеціалізованими для одного певного виду транспорту. Це пов'язано з тим, експлуатаційні показники у різних галузях можуть бути суперечливими. Як приклад, приводи міського транспорту розраховані на високу перевантажувальну здатність, в той час як двигуни вантажних електровозів мають можливість реалізації тривалого режиму роботи з максимальною силою тяги. Зазвичай у тягових приводах використовуються знижуючі редуктори для суттєвого збільшення крутного моменту, але існують також безредукторні приводи. Двигуни, що

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовуються на електротранспорті, можуть працювати як у рушійному режимі, так і в режимі генератора. Властивість оберненості двигунів використовується для електричного гальмування та рекуперації накопленої енергії.

Важливою вимогою є необхідність забезпечення плавного пуску для обмеження ривку при розгоні транспортного засобу. Як сказано вище, раніше це досягалось за рахунок реостатного регулювання, на сьогоднішній день для цього використовуються перетворювачі частоти з керуючими мікроконтролерами, в яких реалізовано певні алгоритми керування.

Для двигунів електротранспорту розрізняють два режими роботи: тривалий режим – при високому струмі якоря протягом необмеженого часу, але не викликаючим перегріву; короткочасний режим – з допустимим перевантаження при пуску, але не довше однієї години.

1.3 Принципи частотного керування та обмеження струмів пуску

Частотне керування є одним із найефективніших способів регулювання режимів роботи асинхронного двигуна, що пояснює його широке застосування в сучасних системах тягового електропривода. Основна ідея такого способу полягає в тому, що швидкість обертання магнітного поля статора визначається частотою живильної напруги. Відповідно, змінюючи частоту, можна впливати на швидкість обертання ротора, а разом з цим — на тягові властивості привода. На практиці це означає можливість плавного пуску, регульованого розгону, підтримання заданої швидкості та раціонального переходу між окремими режимами руху електропоїзда.

На відміну від нерегульованого живлення від мережі промислової частоти, частотне керування дає змогу формувати такі параметри живлення двигуна, які найбільше відповідають поточним умовам роботи. Для електропоїзда це особливо важливо, оскільки його тягове обладнання працює в умовах змінного навантаження. На режим руху впливають маса состава,

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

профіль колії, стан рейкового шляху, погодні умови, а також частота зупинок і повторних пусків. У таких умовах двигун повинен не просто обертатися, а забезпечувати потрібний момент у кожен конкретний момент часу, не виходячи за допустимі межі за струмом, температурою та механічним навантаженням.

Принцип роботи системи частотного керування базується на використанні силового перетворювача, який перетворює параметри вхідної електричної енергії у вихідну трифазну напругу змінної частоти та амплітуди. У більшості випадків така система включає випрямляч, проміжну ланку постійного струму та автономний інвертор. Випрямляч перетворює напругу мережі у постійну, після чого інвертор формує трифазну напругу необхідної частоти для живлення тягового асинхронного двигуна. Саме завдяки цьому стає можливим не лише регулювання швидкості, а й цілеспрямоване керування електромагнітними процесами в машині.

Однією з основних умов правильної роботи асинхронного двигуна є підтримання потрібного співвідношення між напругою і частотою живлення. Якщо змінювати лише частоту, не коригуючи при цьому напругу, магнітний потік двигуна буде змінюватися в небажаних межах. При надмірній напрузі на малих частотах виникає перенасичення магнітної системи, яке супроводжується збільшенням струму, нагріванням та зростанням втрат. Якщо ж напруга буде недостатньою, двигун не зможе створити необхідний момент, що особливо небажано в тягових режимах. Саме тому в найпростішому варіанті частотного керування застосовують закон, відповідно до якого відношення напруги до частоти залишається приблизно сталим.

Однак для тягового електропривода такого підходу часто недостатньо. У реальних умовах рух електропоїзда виникає потреба швидко реагувати на зміни навантаження, забезпечувати достатній момент у пускових режимах і не допускати перевищення допустимих струмів. З цієї причини в сучасних системах застосовують більш досконалі алгоритми, у яких враховується не

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лише частота і напруга, а й струм статора, кутова швидкість, електромагнітний момент та інші параметри. У практичних системах керування зазвичай використовуються замкнені контури регулювання, де фактичні значення струму або швидкості безперервно порівнюються із заданими, а система автоматично коригує керуючий вплив.

Особливе значення в тягових системах має пусковий режим. У момент рушання поїзда з місця двигун повинен створити значний момент для подолання сил інерції, опору коченню та інших зовнішніх опорів. Якщо при цьому двигун підключається до повної напруги без належного регулювання, у його обмотках виникає великий пусковий струм, який може в кілька разів перевищувати номінальний. Таке явище є небажаним з кількох причин. По-перше, надмірний струм призводить до посиленого нагрівання обмоток, що знижує довговічність ізоляції. По-друге, збільшуються електродинамічні навантаження в силових колах. По-третє, виникають додаткові механічні удари в елементах передачі та колісно-моторному блоці. Усе це знижує ресурс обладнання та погіршує умови експлуатації.

Саме тому обмеження струмів пуску є однією з ключових функцій системи частотного керування. На відміну від прямого пуску від мережі, перетворювач частоти дозволяє подавати на двигун напругу та частоту поступово. На початковій стадії пуску двигун живиться струмом і напругою, які відповідають низькій частоті, а потім ці параметри плавно збільшуються відповідно до заданого закону. Завдяки цьому вдається забезпечити м'який розвиток електромагнітного моменту без різкого стрибка струму. Такий спосіб пуску є значно кращим для тягового обладнання, оскільки зменшує перевантаження як електричної, так і механічної частини системи.

Для реалізації обмеження струму можуть застосовуватися різні алгоритми. Найпростішим є обмеження швидкості наростання частоти на виході інвертора. У такому випадку система формує певну пускову характеристику, за якою двигун розганяється плавно і без значних

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перевантажень. Проте цей підхід не завжди враховує реальні зміни навантаження. Наприклад, якщо електропоїзд рушає на підйомі або з великою масою состава, одного лише плавного наростання частоти може бути недостатньо для підтримання струму в допустимих межах. У такій ситуації необхідним є використання зворотного зв'язку за струмом.

Система із зворотним зв'язком за струмом працює таким чином, що фактичне значення струму безперервно вимірюється датчиками та надходить до регулятора. Якщо струм перевищує заданий рівень, система автоматично зменшує темп наростання частоти або знижує керуючий вплив на інвертор. Якщо ж струм знаходиться в допустимих межах, процес розгону продовжується у звичайному режимі. Такий принцип дозволяє адаптувати пуск до реальних умов експлуатації і підтримувати безпечний режим роботи навіть при змінному навантаженні. Крім того, це створює передумови для підвищення надійності всієї тягової системи.

У тяговому приводі важливо враховувати, що надто жорстке обмеження струму також небажане. Якщо система занадто сильно зменшує пусковий струм, двигун може не розвинути потрібного моменту для впевненого рушання. У такому випадку збільшується час розгону, погіршуються динамічні характеристики поїзда, а іноді виникає навіть нестійка робота на малих швидкостях. Тому під час проектування системи керування необхідно знаходити раціональний компроміс між обмеженням струму та забезпеченням достатнього тягового моменту. Межа струму повинна вибиратися так, щоб одночасно виконувалися вимоги до безпеки, надійності та тягових властивостей.

Слід зазначити, що пусковий струм тісно пов'язаний із формуванням електромагнітного моменту. Для асинхронного двигуна момент у значній мірі залежить від магнітного потоку та струму ротора, які, у свою чергу, визначаються параметрами напруги і частоти. Саме тому обмеження струму не може розглядатися окремо від загального закону частотного керування. У

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

добре спроектованій системі обмеження струму є не окремим захистом, а складовою загального алгоритму, який забезпечує раціональний пуск, плавний розгін і стабільну роботу на всіх швидкостях.

Важливе значення має також спосіб формування вихідної напруги інвертором. У сучасних системах для цього широко використовується широтно-імпульсна модуляція. Її застосування дозволяє з високою точністю змінювати діюче значення та частоту напруги, що подається на статор двигуна. Крім того, завдяки такому методу вдається наблизити форму струму до синусоїдальної, зменшити гармонічні складові та поліпшити енергетичні показники системи. Для тягового електропривода це має практичне значення, оскільки зниження пульсацій моменту позитивно впливає на плавність ходу та механічний стан передачі.

Умови роботи електропоїзда вимагають, щоб система частотного керування забезпечувала не лише пуск, а й раціональне проходження всіх перехідних режимів. Після рушання двигун переходить у режим розгону, де також можливе значне зростання струму при швидкому підвищенні навантаження або зміні умов руху. Тому алгоритм обмеження струму повинен діяти не тільки в початковий момент, а й протягом усього процесу розгону. Це особливо важливо у випадках, коли поїзд змінює режим руху на складних ділянках профілю колії або працює з різним ступенем завантаження.

Окремо слід підкреслити, що застосування частотного керування з обмеженням струмів пуску має не лише технічні, а й експлуатаційні переваги. Зменшення пускових перевантажень дозволяє збільшити термін служби двигуна, інвертора, кабельних з'єднань і механічних передач. Знижується теплова напруженість обмоток, покращується стан ізоляції, зменшуються ударні навантаження в редукторі та колісно-моторних вузлах. У підсумку це призводить до підвищення надійності рухомого складу та зменшення витрат на технічне обслуговування.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того, частотне керування створює кращі умови для енергоощадної роботи. Плавний пуск без надмірних струмових кидків знижує втрати електроенергії в обмотках, напівпровідникових елементах та живильній мережі. Для електропоїздів, що працюють у режимі частих зупинок і повторних розгонів, це має особливо велике значення, оскільки сумарний ефект енергозбереження за тривалий період експлуатації є відчутним. Саме тому системи частотного керування розглядаються не лише як засіб підвищення керованості, а й як один із напрямів підвищення економічності залізничного транспорту.

Отже, принцип частотного керування полягає у регулюванні швидкості, моменту та струму асинхронного двигуна шляхом зміни параметрів його живлення. У тягових умовах особливого значення набуває здатність системи забезпечувати плавний пуск і надійне обмеження струмів пуску. Це досягається завдяки узгодженій зміні частоти та напруги, використанню замкнених контурів регулювання, зворотного зв'язку за струмом і сучасних методів керування інвертором. Реалізація таких принципів дозволяє підвищити надійність тягового обладнання, зменшити перевантаження, покращити динамічні характеристики електропоїзда та створити умови для більш ефективної експлуатації.

Найбільш популярними методами оптимального керування є методи, засновані на використанні аналітичних виразів для визначення різних видів втрат, наведених у попередньому параграфі. Такі методи поєднують в одну групу, яку називають Loss Model Control (LMC) – керування, засноване на моделях втрат.

Ефект від застосування методів мінімізації втрат енергії в усталених режимах буде суттєвим тільки для приводів, що досить часто працюють з майже постійним та невеликим моментом навантаження ($TL < 0.4T_n$), або з моментом навантаження, що змінюється повільно у тому ж діапазоні. Цей метод буде особливо актуальним при керуванні приводом локомотива, так як

розгін з максимальним моментом займає відносно невелику долю часу у порівнянні з рухом із підтриманням сталої швидкості, де потребується значно менший момент для подолання сил тертя та аеродинамічного супротиву.

Одним із самих простих методів підвищення ККД є стратегія «Максимальний момент на ампер», яка полягає у забезпеченні максимально можливого відношення електромагнітного моменту двигуна до струму статора. Така стратегія приводить до мінімізації теплових втрат у міді статора і сприяє підвищенню ККД в усталеному режимі.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто особливості застосування систем частотного керування при роботі тягового асинхронного двигуна електропоїзда. Показано, що електропоїзд, на відміну від електровоза, працює в умовах частих пусків, розгонів, уповільнень і зупинок, тому до його тягового електропривода висуваються підвищені вимоги щодо плавності регулювання, швидкодії, енергоефективності та надійності. Встановлено, що сучасний тяговий привід має складну структуру, до складу якої входять джерело живлення, силовий перетворювач, тяговий двигун, передавальний механізм і система автоматичного керування. Саме узгоджена робота цих елементів визначає тягово-динамічні показники рухомого складу.

У ході аналізу особливостей тягового асинхронного двигуна встановлено, що він є доцільним для використання на електропоїздах завдяки простоті конструкції, відсутності колекторно-щіткового вузла, високій надійності та зменшеним витратам на технічне обслуговування. Разом з тим такий двигун працює в складних експлуатаційних умовах, які характеризуються широким діапазоном швидкостей, частими перехідними режимами, значними механічними, тепловими та електричними перевантаженнями. Це обумовлює необхідність застосування ефективної системи керування, здатної забезпечити потрібний тяговий момент,

допустимий температурний режим і стабільну роботу в умовах змінного навантаження.

Отже, результати розгляду теоретичних і технічних аспектів роботи тягового асинхронного двигуна підтверджують доцільність проектування системи частотного керування електропоїзда з обмеженням струмів пуску. Це створює необхідну основу для подальшого аналізу існуючих технічних рішень, виконання розрахунків основних елементів системи та моделювання її режимів роботи в наступних розділах дипломної роботи.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 АНАЛІЗ РОБОТИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДА

2.1 Структура та основні елементи тягового електроприводу

Тяговий електропривод електропоїзда являє собою сукупність електричних, електромеханічних і керуючих елементів, які забезпечують перетворення електричної енергії контактної мережі в механічну енергію руху поїзда. Його робота визначається узгодженою взаємодією джерела живлення, силового перетворювача, тягового електродвигуна, механічної передачі та системи керування. Саме від будови цієї системи залежать тягові властивості електропоїзда, характер розгону, плавність пуску, величина струмових навантажень та економічність роботи. Для сучасного електропоїзда тяговий електропривод є не окремим вузлом, а функціонально завершеною системою, що визначає основні експлуатаційні показники рухомого складу.

Ключовим елементом системи є силовий електронний перетворювач на базі IGBT-транзисторів. Він трансформує вхідний струм у трифазну систему з регульованою частотою та амплітудою. Саме цей блок дозволяє плавно змінювати швидкість поїзда, керуючи роботою асинхронних тягових електродвигунів. Останні перетворюють електрику на механічну силу, яка через тягову передачу та редуктор змушує колеса обертатися.

Керує всім процесом мікропроцесорна система, яка не лише реагує на команди машиніста, а й контролює зчеплення коліс із рейками, запобігаючи буксуванню. Важливою особливістю такої структури є можливість рекуперації: під час гальмування двигуни переходять у режим генераторів, виробляючи струм, який через перетворювачі повертається назад у мережу, що значно підвищує енергоефективність транспорту.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

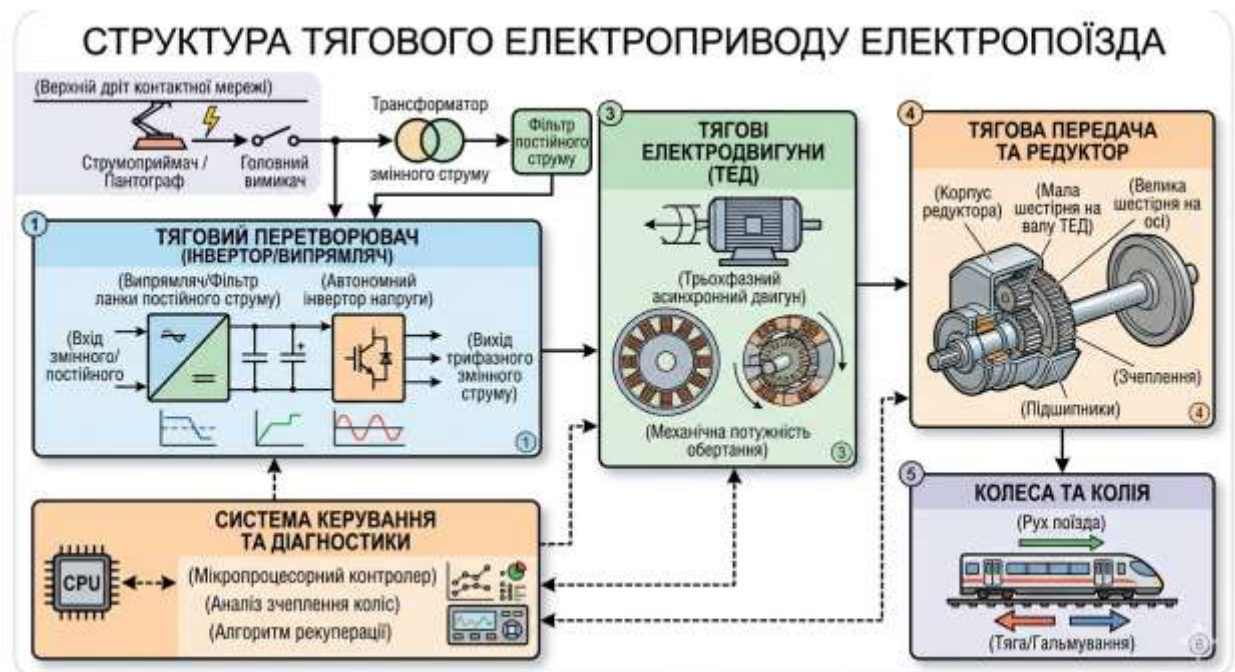


Рисунок 2.1 – Структура тягового електроприводу електропоїзда

До складу тягового електроприводу входять пристрої підведення електроенергії, силова перетворювальна частина, тяговий двигун, механічна передача та система автоматичного керування. Кожен із цих елементів виконує окрему функцію, однак тільки їх спільна робота забезпечує створення тягового зусилля на колісних парах у всіх режимах руху. На практиці це означає, що порушення роботи хоча б однієї з ланок призводить до погіршення динамічних характеристик поїзда, зростання втрат енергії або виникнення аварійних режимів. Саме тому структура тягового електроприводу повинна розглядатися як єдина взаємопов'язана система.

Табл. 2.1 – Основні елементи тягового ел.приводу електропоїздів

Елемент тягового електроприводу	Призначення
Контактна мережа	Є зовнішнім джерелом електричної енергії для живлення електропоїзда
Струмоприймач	Забезпечує знімання електроенергії з контактної мережі та подачу її до силового кола електропоїзда
Ввідні та захисні апарати	Призначені для комутації силового кола, захисту обладнання від коротких замикань, перевантажень і аварійних режимів
Силовий випрямляч	Перетворює змінний струм у постійний у тих схемах, де це необхідно для подальшого живлення інвертора
Проміжна ланка постійного струму (фільтр)	Згладжує пульсації напруги, накопичує енергію та забезпечує стабільну роботу силового перетворювача
Автономний інвертор	Формує трифазну напругу змінної частоти та амплітуди для живлення тягового асинхронного двигуна
Система керування	Формує керуючі сигнали для силового перетворювача, реалізує алгоритми пуску, розгону, гальмування та обмеження струмів
Датчики струму, напруги, швидкості	Забезпечують контроль основних параметрів роботи електроприводу та формують сигнали зворотного зв'язку
Тяговий асинхронний двигун	Перетворює електричну енергію в механічну та створює крутний момент для руху електропоїзда
Механічна передача (редуктор, муфти)	Передає крутний момент від двигуна до колісної пари та узгоджує швидкість обертання двигуна з швидкістю руху поїзда
Колісна пара	Сприймає крутний момент від механічної передачі та реалізує тягове зусилля на рейках
Система охолодження	Підтримує допустимий температурний режим двигуна і силового перетворювача під час роботи

Першою ланкою тягового електроприводу є система підведення електричної енергії від контактної мережі. Електрична енергія надходить через струмоприймач, після чого через струмопровідні шини, захисні та комутаційні апарати передається до силового кола електроприводу. У цій частині системи важливими є надійність струмознімання, стійкість до атмосферних впливів, електрична міцність ізоляції та здатність працювати при вібраціях і механічних навантаженнях. Також саме тут розміщуються основні

апарати захисту, які запобігають пошкодженню обладнання при коротких замиканнях, перевантаженнях та інших аварійних режимах.

Електрична енергія для роботи тягового електроприводу електропоїзда надходить від контактної мережі через струмоприймач до ввідних і захисних апаратів, після чого подається до силового перетворювача. У складі силового перетворювача відбувається перетворення параметрів електроенергії до значень, необхідних для живлення тягового асинхронного двигуна. Залежно від прийнятої структури привода ця частина може включати випрямляч, проміжну ланку постійного струму та автономний інвертор. Після перетворення електрична енергія надходить до тягового асинхронного двигуна, де перетворюється на механічну енергію обертання. Далі крутний момент через механічну передачу передається на колісну пару, яка реалізує тягове зусилля і забезпечує рух електропоїзда. Робота всіх елементів узгоджується системою керування, що формує керуючі сигнали для силового перетворювача, контролює основні параметри електроприводу та забезпечує потрібні режими пуску, розгону, руху і гальмування. Однією з найважливіших частин тягового електроприводу є силовий перетворювач. Його призначення полягає в перетворенні параметрів електричної енергії до значень, необхідних для живлення тягового електродвигуна. У сучасних системах така частина може включати випрямляч, проміжну ланку постійного струму, згладжувальні елементи та автономний інвертор. Саме інвертор формує трифазну напругу змінної частоти та амплітуди, яка подається на асинхронний тяговий двигун. Завдяки цьому стає можливим плавне регулювання швидкості, моменту та струму двигуна, що особливо важливо під час пуску і розгону електропоїзда.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28



Рис. 2.2 – Функціональна схема силового перетворювача тягового електроприводу

Центральним виконавчим елементом системи є тяговий електродвигун. У сучасному електропоїзді дедалі ширше застосовуються асинхронні двигуни, які мають відносно просту конструкцію, відзначаються надійністю та не потребують складного колекторно-щіткового обслуговування. Водночас умови їхньої роботи є досить жорсткими. Двигун працює при частих пусках, розгонах, уповільненнях, змінному навантаженні, вібраціях, температурних перепадах і запиленості. Саме тому нормальна робота тягового асинхронного двигуна можлива лише за наявності ефективної системи керування, що здатна підтримувати потрібний момент і обмежувати пускові струми в допустимих межах.

До основних елементів тягового електроприводу електропоїзда належать джерело живлення, силовий перетворювач, тяговий електродвигун, механічна передача, колісна пара та система автоматичного керування. Сукупна робота цих елементів забезпечує перетворення електричної енергії, що надходить із контактної мережі, у механічну енергію руху поїзда. Така структура є характерною для сучасного тягового привода, де кожна ланка

виконує окрему функцію, але лише їх узгоджена взаємодія забезпечує потрібні тягово-динамічні показники.

Джерело живлення забезпечує подачу електричної енергії до всіх силових кіл електропоїзда. Електроенергія надходить від контактної мережі через струмоприймач, після чого через ввідні, комутаційні та захисні апарати передається до силової частини електроприводу. Ця частина системи повинна забезпечувати надійне струмознімання, електричну безпеку та стабільність живлення за різних умов експлуатації.

Силовий перетворювач призначений для перетворення параметрів електричної енергії до значень, необхідних для живлення тягового асинхронного двигуна. Залежно від прийнятої структури він може включати випрямляч, проміжну ланку постійного струму, фільтрувальні елементи та автономний інвертор. Саме ця частина забезпечує формування напруги потрібної частоти та амплітуди, що дає можливість реалізувати плавний пуск, регулювання швидкості та обмеження струмів у перехідних режимах.

Тяговий асинхронний двигун є основним виконавчим елементом привода, оскільки він безпосередньо перетворює електричну енергію на механічну енергію обертання. Для нього характерні робота в широкому діапазоні швидкостей, часті пуски, значні перевантаження та підвищені вимоги до надійності. У сучасному електропоїзді асинхронний двигун використовується завдяки простоті конструкції, відсутності колекторно-щіткового вузла та зменшеним витратам на технічне обслуговування.

Механічна передача забезпечує передавання крутного моменту від вала тягового двигуна до колісної пари. Зазвичай вона виконується у вигляді редуктора та з'єднувальних елементів, що узгоджують частоту обертання двигуна з умовами руху поїзда. Через механічну передачу реалізується безпосередній зв'язок між електричною та ходовою частинами електропоїзда, тому її стан і конструкція суттєво впливають на плавність ходу, динамічні навантаження та довговічність привода.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Колісна пара є завершальною ланкою тягового електроприводу, оскільки саме через неї крутний момент перетворюється на тягове зусилля, що реалізується на рейках. Вона сприймає навантаження від механічної передачі та забезпечує безпосередній рух електропоїзда. Робота колісної пари тісно пов'язана з тяговими режимами, оскільки під час пуску, розгону та гальмування саме на цій ланці проявляються результати роботи всієї системи електроприводу.

Система автоматичного керування координує роботу всіх елементів тягового електроприводу. Вона формує керуючі сигнали для силового перетворювача, реалізує алгоритми пуску, розгону, зміни швидкості та гальмування, а також забезпечує контроль основних параметрів роботи двигуна. У сучасних системах керування велике значення мають сигнали зворотного зв'язку за струмом, швидкістю та іншими координатами, що дозволяє підтримувати необхідні режими роботи і не допускати перевантажень.

Таким чином, основні елементи тягового електроприводу утворюють єдину функціональну систему, у якій джерело живлення забезпечує подачу енергії, силовий перетворювач змінює її параметри, тяговий двигун створює крутний момент, механічна передача передає його на колісну пару, а система керування узгоджує роботу всіх ланок. Саме така побудова забезпечує потрібні тягові характеристики електропоїзда, стабільність роботи привода та можливість реалізації частотного керування з обмеженням струмів пуску.

Механічна частина тягового електроприводу забезпечує передачу крутного моменту від вала двигуна до колісної пари. У більшості випадків для цього застосовується редуктор, який дозволяє узгодити частоту обертання двигуна з частотою обертання коліс та забезпечити потрібне тягове зусилля. До механічної частини також належать елементи підвіски двигуна, моторно-осьові підшипники, кріплення та колісні пари. Під час роботи електроприводу саме механічна передача сприймає значні динамічні навантаження, особливо

в моменти пуску, різкого розгону або гальмування. Тому при розгляді структури привода важливо враховувати тісний взаємозв'язок електричних і механічних процесів.

Не менш важливою частиною тягового електроприводу є система керування. Вона забезпечує формування керуючих сигналів для силового перетворювача, контроль основних параметрів роботи двигуна, реалізацію алгоритмів пуску, розгону, стабілізації швидкості та обмеження струмів. У сучасних системах керування використовуються замкнені контури регулювання за струмом, швидкістю або моментом, а також засоби захисту і діагностики. Саме система керування узгоджує роботу всіх елементів привода і забезпечує його стійке функціонування в різних режимах експлуатації. Від її якості значною мірою залежать енергетичні показники електропоїзда, плавність ходу та надійність усього тягового обладнання.

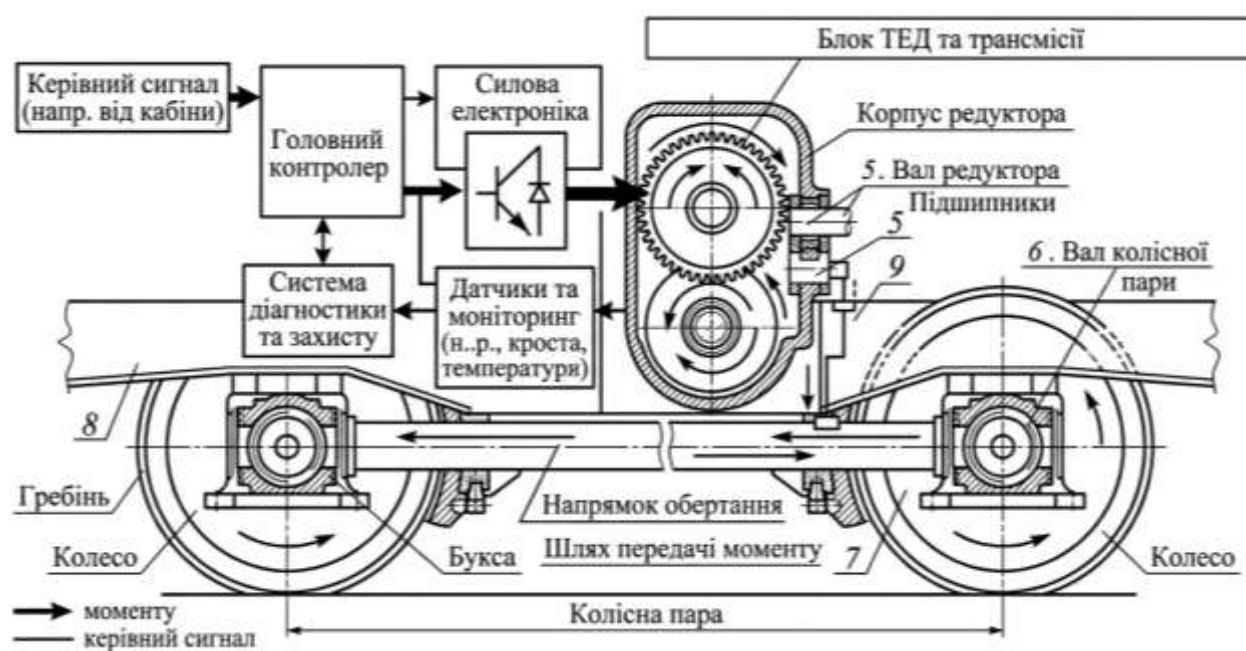


Рис. 2.3 – Узагальнена схема системи керування тяговим електроприводом

Таким чином, тяговий електропривод електропоїзда має складну багатоланкову структуру, у якій кожний елемент виконує окрему функцію, але тільки їхня узгоджена робота забезпечує необхідні тягові та енергетичні показники. Джерело живлення, силовий перетворювач, тяговий асинхронний

двигун, механічна передача та система керування утворюють єдину систему, параметри якої визначають характер роботи поїзда в усіх режимах руху. Саме така структура створює технічну основу для застосування сучасних частотно-керованих систем з обмеженням струмів пуску.

2.2 Огляд систем керування тяговими двигунами

Система керування тяговим електроприводом є одним із визначальних вузлів сучасного рухомого складу, оскільки саме вона забезпечує узгоджену роботу силового перетворювача, тягового двигуна та механічної передачі. Від її структури та принципу дії залежать плавність пуску, точність регулювання швидкості, економічність використання електроенергії, надійність обладнання та допустимий рівень навантаження на контактну мережу. У процесі розвитку електричного транспорту системи керування тяговими двигунами поступово ускладнювалися: від простих реостатно-контакторних схем до сучасних мікропроцесорних систем частотного керування. Така еволюція була зумовлена необхідністю підвищення енергоефективності, зменшення втрат у пускових режимах, покращення динамічних показників та зниження експлуатаційних витрат.

Система керування тяговим електроприводом є одним із найважливіших елементів сучасного рухомого складу, оскільки саме вона забезпечує узгоджену роботу силового перетворювача, тягового двигуна та механічної передачі. Від її побудови та принципу дії залежать плавність пуску, характер розгону, точність регулювання швидкості, енергетична ефективність, надійність обладнання та ступінь впливу на контактну мережу. У процесі розвитку електричного транспорту системи керування тяговими двигунами змінювалися від простих контакторних схем до складних електронних систем із мікропроцесорним керуванням. Це було зумовлено потребою зменшення втрат електроенергії, покращення динамічних характеристик, підвищення ресурсу тягового обладнання та забезпечення більш економічної експлуатації електропоїздів.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 2.4 – Класифікація існуючих систем керування тяговими двигунами

Історично та технологічно системи керування тяговими двигунами доцільно поділити на три основні групи: реостатно-контакторні системи керування, тиристорно-імпульсні системи керування та частотно-регульований привід. Кожна з цих систем відповідає певному етапу розвитку тягового електропривода і відрізняється як принципом регулювання, так і технічними та експлуатаційними характеристиками.

Реостатно-контакторні системи були характерні переважно для тягових двигунів постійного струму і є найбільш раннім типом керування. Тиристорно-імпульсні системи стали проміжним етапом між класичними схемами та сучасними електронними приводами. Частотно-регульований привід є найбільш сучасною системою, що використовується головним чином з асинхронними двигунами та дозволяє забезпечити високі показники плавності керування, енергоефективності й автоматизації.

Реостатно-контакторна система керування базується на ступінчастій зміні параметрів живлення тягового двигуна за допомогою пускових резисторів і контакторної апаратури. У таких системах регулювання відбувається шляхом послідовного виведення опору з силового кола в міру зростання швидкості руху. Це дозволяє обмежувати пусковий струм на

початковому етапі розгону, однак супроводжується значними втратами електроенергії в резисторах.

Основною перевагою таких систем є простота конструкції та відносна надійність за умови своєчасного технічного обслуговування. Крім того, вони довгий час залишалися найбільш доступним технічним рішенням для тягових двигунів постійного струму. Проте реостатно-контакторні системи мають і суттєві недоліки. Насамперед це низька енергоефективність у пускових режимах, значне тепловиділення в резисторах, ступінчастий характер регулювання та підвищене зношування контакторної апаратури. Для електропоїздів із частими зупинками ці недоліки проявляються особливо сильно, оскільки багаторазові пуски призводять до великих втрат енергії та зростання механічних навантажень.

Наступним етапом розвитку стали тиристорно-імпульсні системи керування. Їх поява була пов'язана із впровадженням силових напівпровідникових приладів, які дозволили перейти від грубого ступінчастого регулювання до більш плавної зміни напруги на тяговому двигуні. У таких системах регулювання здійснюється шляхом зміни режиму роботи тиристорів, завдяки чому можна більш точно керувати середнім значенням напруги, що підводиться до двигуна.

У порівнянні з реостатно-контакторними системами тиристорно-імпульсне керування має вищу енергоефективність, оскільки зменшуються втрати електроенергії в пускових елементах. Крім того, покращується плавність розгону, зменшується ударне навантаження на механічну передачу та розширюються можливості автоматизації. Разом із тим тиристорно-імпульсні системи також мають певні недоліки. До них належать ускладнення силової схеми, наявність гармонічних спотворень у мережі, підвищені вимоги до захисту та охолодження, а також збереження залежності від тягових двигунів постійного струму, які самі по собі є складнішими в обслуговуванні.

Найбільш сучасною системою керування тяговими двигунами є частотно-регульований привід. Його використання стало можливим завдяки розвитку силової електроніки, мікропроцесорної техніки та замкнених систем автоматичного регулювання. У такому приводі живлення тягового асинхронного двигуна здійснюється через силовий перетворювач, що формує трифазну напругу змінної частоти та амплітуди.

Головною перевагою частотно-регульованого привода є можливість плавного і безперервного регулювання швидкості та моменту двигуна в широкому діапазоні. Саме це дозволяє забезпечити м'який пуск, зменшити пускові струми, знизити навантаження на механічну передачу та підвищити енергоефективність. Крім того, асинхронний двигун не має колекторно-щіткового вузла, що підвищує його надійність і зменшує витрати на обслуговування. Сучасні системи частотного керування дозволяють реалізовувати регулювання за струмом, швидкістю та моментом, а також адаптувати режими роботи до змінного навантаження.

До недоліків частотно-регульованого привода можна віднести більшу складність побудови, вищу вартість силової електроніки та підвищені вимоги до систем захисту, діагностики й охолодження. Однак з урахуванням експлуатаційних переваг саме ця система є найбільш доцільною для сучасного електропоїзда, особливо в умовах частих пусків і необхідності обмеження струмів.

Таблиця 2.3 – Порівняльна характеристика існуючих систем керування тяговими двигунами

Система керування	Тип двигуна	Спосіб регулювання	Переваги	Недоліки
Реостатно-контакторна	Двигун постійного струму	Ступінчасте регулювання за допомогою резисторів і контакторів	Простота, відпрацьована конструкція	Великі втрати енергії, ривки, зношування апаратури
Тиристорно-імпульсна	Переважно двигун постійного струму	Плавна зміна напруги тиристорними перетворювачами	Краща плавність, менші втрати, автоматизація	Складніша схема, гармоніки, підвищені вимоги до захисту
Частотно-регульований привід	Асинхронний двигун	Регулювання частоти та напруги живлення	Висока енергоефективність, плавний пуск, обмеження струму, надійність	Складність, вища вартість, потреба в сучасній силовій електроніці

Порівняльна характеристика існуючих систем керування тяговими двигунами свідчить про поступовий перехід від простих, але енергетично неекономічних схем до сучасних високоефективних електронних систем. Реостатно-контакторні системи відіграли важливу роль у розвитку електричної тяги, однак у сучасних умовах їх застосування обмежується великими втратами енергії, недостатньою плавністю регулювання та підвищеним зношуванням комутаційної апаратури. Тиристорно-імпульсні системи стали важливим проміжним етапом, оскільки дозволили зменшити втрати та покращити якість регулювання, проте вони також не забезпечили повного вирішення проблеми оптимального керування в усіх тягових режимах. Найкращі показники має частотно-регульований привід, який дозволяє плавно змінювати швидкість і момент двигуна, знижувати пускові струми, зменшувати навантаження на механічну передачу та підвищувати

загальну енергоефективність рухомого складу. З урахуванням цього саме частотне керування слід розглядати як найбільш доцільну основу для побудови сучасного тягового електропривода електропоїзда.

Таким чином, порівняння існуючих систем керування тяговими двигунами показує, що найбільш важливою умовою ефективної роботи тягового електроприводу є забезпечення плавного пуску та обмеження струмових перевантажень у перехідних режимах. Саме в момент пуску найбільш повно проявляються недоліки або переваги конкретної системи керування, оскільки від характеру наростання струму і моменту залежать динаміка розгону, теплове навантаження на двигун і надійність силового обладнання. У зв'язку з цим далі доцільно розглянути особливості пускових режимів та основні причини виникнення великих пускових струмів у тяговому електроприводі електропоїзда.

2.3 Аналіз алгоритмів керування

Через вимоги до електроприводів у механізмах, в яких застосовуються асинхронні електроприводи, особливого значення набуває вибір алгоритму керування. Саме алгоритм керування визначає характер формування електромагнітного моменту, точність підтримання швидкості, стійкість роботи привода при змінному навантаженні, а також рівень струмових перевантажень у пускових і перехідних режимах. Для тягового асинхронного електропривода електропоїзда це питання є особливо важливим, оскільки привід працює в умовах частих пусків, розгонів, уповільнень та змінного моменту опору. У сучасних системах керування найбільш поширеними є два основні підходи: скалярне та векторне керування.

Скалярне керування є найпростішим і найбільш поширеним способом регулювання асинхронного двигуна. Його суть полягає в одночасній зміні частоти та амплітуди статорної напруги за певним законом, найчастіше за співвідношенням

$$U/f=\text{const} \quad (2.1)$$

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Такий підхід дозволяє підтримувати магнітний потік двигуна приблизно на сталому рівні та забезпечувати регулювання швидкості в досить широкому діапазоні. Перевагою скалярного керування є відносна простота реалізації, невисокі вимоги до обчислювальних ресурсів системи керування та достатня ефективність у випадках, коли до електропривода не висуваються жорсткі вимоги щодо точності регулювання швидкості та динамічних показників.

Разом із тим скалярне керування має суттєві обмеження. За такого способу керування регулюються лише частота і амплітуда статорної напруги, тоді як електромагнітні процеси в двигуні не розділяються окремо за каналами потоку і моменту. У результаті зберігається нелінійність механічних характеристик асинхронного двигуна, що ускладнює забезпечення стабільних режимів роботи при змінному навантаженні. За значних змін моменту навантаження точність підтримки швидкості в системах скалярного керування, як правило, не перевищує 5 %, що для тягового електропривода може бути недостатнім. Особливо це проявляється в режимах рухання з місця, розгону на підйомі або при зміні маси состава, коли двигун повинен швидко реагувати на зміну умов роботи.

Для часткового покращення якості скалярного керування в практиці застосовують різні види корекції, зокрема IR-компенсацію та ковзальну або S-компенсацію. Їх призначення полягає у зменшенні статичної помилки регулювання швидкості за рахунок додаткового коригування напруги або частоти живлення двигуна. Проте такі засоби не вирішують проблему принципово. В окремих режимах вони справді дозволяють дещо покращити характеристики привода, однак за змінного навантаження або в широкому діапазоні регулювання можуть погіршувати стійкість системи. Саме тому скалярне керування, незважаючи на простоту, не забезпечує тієї якості регулювання, яка необхідна для сучасного тягового електропривода електропоїзда.

Іншим, значно досконалішим підходом є векторне керування асинхронним двигуном. Його основна ідея полягає в роздільному керуванні складовими струму, що відповідають за створення магнітного потоку та електромагнітного моменту. Такий підхід дозволяє наблизити асинхронний електропривод за характеристиками керування до електропривода постійного струму, для якого характерні більш лінійні й зручні для регулювання властивості. Саме тому векторне керування часто розглядається як основа для побудови високоякісних систем автоматизованого електропривода.

На теперішній час у зв'язку з вдосконаленням напівпровідникових технологій найбільш поширеним є векторне (або полеорієнтоване керування). В проаналізованій літературі досліджуються особливості такого керування за різних умов з метою вдосконалення даного методу керування.

Векторне керування поділяється на пряме і непряме. Пряме векторне керування потребує розрахунку спостерігача, що у свою чергу ускладнює математичну модель. Загальний алгоритм непрямого векторного керування АД є найбільш простим, тому що не потребує використання спостерігача. Для моделювання систем керування АД прийнято використовувати математичну модель, що записується в стаціонарній системі координат (a-b):

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega, \quad M = \mu(\psi_{2a}i_{1b} - \psi_{2b}i_{1a}), \\ i_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta p_n\omega\psi_{2b} + \frac{1}{\sigma}u_{1a}, \\ i_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} + \beta p_n\omega\psi_{2a} + \frac{1}{\sigma}u_{1b}, \\ \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha\psi_{2a} - p_n\omega\psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\ \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha\psi_{2b} - p_n\omega\psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}.\end{aligned}\tag{2.2}$$

де ω – кутова швидкість ротора,

$(a-b), (\psi_{2a}, \psi_{2b})^T$ – компоненти вектора потокозчеплень ротора,

$(u_{1a}, u_{1b})^T$ – компоненти вектора напруги статора,

M_c – момент навантаження,

ν – коефіцієнт в'язкого тертя,

u – миттєве значення напруги

Для переходу з системи координат $(a-b)$, у синхронну систему координат ротора $(d-q)$, яка обертається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю ω_0 , виконується перетворення Парка-Горева, яке визначається наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} x_{dq} &= e^{-J\varepsilon_0} x_{ab}, \\ x_{ab} &= e^{J\varepsilon_0} x_{dq}, \\ e^{-J\varepsilon_0} &= \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

Алгоритми прямого на непрямого векторного керування забезпечують наступні показники якості:

- глобальне асимптотичне відпрацювання заданої траєкторії швидкості, при обмеженні усіх внутрішніх змінних:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0 \quad (2.4)$$

- асимптотичне орієнтування по вектору потокозчеплення ротора;
- асимптотичну лінеаризацію підсистеми швидкості до лінійної повністю керованої форми;
- асимптотичну розв'язку процесів керування електромеханічними та електромагнітних координат АД.

Для синтезу алгоритмів системи керування спочатку синтезується підсистема керування потокозчепленням, а потім підсистема керування

швидкістю. Обидві підсистеми синтезуються з використанням зворотної покрокової процедури проектування.

Структура алгоритму непрямого векторного керування містить у собі наступні регулятори:

розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення

$$\begin{aligned} i_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*) , \\ i_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*) , \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{\psi^*} , \end{aligned} \quad (2.5)$$

регулятор струму по осі (d) (польової складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma \left(\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_{i1d} \tilde{i}_{1d} - x_d \right) , \\ \dot{x}_d &= k_{i1d} \tilde{i}_{1d} , \end{aligned} \quad (2.6)$$

регулятор кутової швидкості

$$\begin{aligned} \dot{i}_{1q}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left(-k_{\omega} \tilde{\omega} + \dot{M}_c + \dot{\omega}^* + \nu \omega^* \right) , \\ \dot{M}_c &= -k_{\omega} \tilde{\omega} , \\ \dot{i}_{1q}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_{\omega} \left(-k_{\omega} \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q \right) + \dot{M}_c + \dot{\omega}^* + \nu \omega^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^* \end{aligned} \quad (2.7)$$

регулятор струму по осі (q) (моментної складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sigma \left(\gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta \omega p_n \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_{i1q} \tilde{i}_{1q} - x_q \right) , \\ \dot{x}_q &= k_{i1q} \tilde{i}_{1q} , \end{aligned} \quad (2.8)$$

Перевагою векторного керування є вища точність підтримання швидкості, краща якість перехідних процесів та можливість швидкого формування необхідного електромагнітного моменту. Це особливо важливо для тягового електропривода, де в пускових режимах двигун повинен

розвивати значний момент без надмірного збільшення струму. Векторне керування дозволяє більш точно регулювати момент двигуна, покращувати динаміку розгону, зменшувати коливання швидкості та підвищувати стійкість системи при змінному навантаженні. Крім того, саме такий алгоритм краще підходить для реалізації замкнених контурів за струмом, швидкістю і моментом, що є характерним для сучасних тягових систем.

Однак на практиці векторне керування не завжди забезпечує абсолютно стабільну роботу в широкому діапазоні регулювання швидкостей і змін навантаження. Це пов'язано з тим, що його алгоритми базуються на математичній моделі двигуна і чутливі до точності визначення параметрів ротора, статора, потоку та ковзання. У реальних умовах експлуатації значення цих параметрів можуть змінюватися через нагрівання обмоток, коливання напруги живлення, зміну навантаження, похибки датчиків та інші фактори. Унаслідок цього точність оцінки стану двигуна зменшується, що може призводити до погіршення якості регулювання. Отже, векторне керування є більш ефективним, але водночас більш складним і чутливим до налаштування системи.

Ще однією важливою особливістю векторного керування є його підвищені вимоги до технічної реалізації. Для забезпечення належної роботи необхідні датчики струму, а в багатьох випадках і датчики швидкості або спеціальні алгоритми її оцінювання. Крім того, система керування повинна виконувати перетворення координат, обчислення потоку, моменту та інших змінних у реальному часі. Це вимагає використання мікропроцесорних або цифрових сигнальних контролерів з достатньою швидкодією. У порівнянні зі скалярним керуванням така система є складнішою, дорожчою та більш вимогливою до налаштування, однак саме вона дозволяє отримати кращі регульовальні характеристики.

Для тягового асинхронного електропривода електропоїзда вибір між скалярним і векторним керуванням визначається вимогами до точності,

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

динаміки та умов експлуатації. Якщо система повинна забезпечувати лише відносно просте регулювання швидкості без високих вимог до динамічних характеристик, скалярне керування може бути технічно допустимим. Проте для тягового привода, де важливими є плавний пуск, швидке формування моменту, робота при змінному навантаженні та обмеження струмів пуску, більш доцільним є застосування векторного керування. Саме воно дозволяє забезпечити більш гнучке і точне керування тяговим асинхронним двигуном у складних режимах роботи електропоїзда.

Таким чином, скалярне керування відзначається простотою реалізації, але має обмежені можливості щодо точності регулювання та якості перехідних процесів. Векторне керування є складнішим за структурою, проте дозволяє отримати кращі характеристики електропривода, наблизивши його до лінійних систем регулювання. З урахуванням специфіки роботи тягового асинхронного двигуна електропоїзда саме векторне керування є більш перспективним алгоритмом, особливо в системах, де необхідно забезпечити плавний пуск, високу якість регулювання та ефективне обмеження струмів у перехідних режимах.

Додатково, варто розглянути недоліки скалярного керування. Одними з цих недоліків є наявність статичної похибки, яка пов'язана із ковзанням асинхронної машини, та неможливість відпрацювання нульової швидкості. Остання проблема виникає через те, що на нульовій швидкості дана система керування подає на статор напругу нульової амплітуди. Так як момент АД квадратично залежить від напруги, машина починає провалюватися по швидкості через неможливість протидії статичному моменту. Але у цієї системи є і переваги – це простота її реалізації, а також можливість одночасного регулювання швидкості обертання декількох двигунів.

При скалярному керуванні напруга змінюється одночасно з частотою по певному закону. Для підтримання певних характеристик двигуна при зменшенні амплітуди напруги підвищується її частота і навпаки – при

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшенні частоти зростає амплітудне значення напруги живлення. За рахунок цього ми маємо незмінне відношення номінального та критичного моменту, а також незмінну жорсткість характеристик. Але на низьких швидкостях критичний момент починає суттєво знижуватись, що призводить до неможливості роботи на малих частотах обертання.

Керування двигунами електротранспорту може досягатися за рахунок використання прямого керування моментом, алгоритм якого буде обраховувати мікроконтролер. Сам по собі цей метод є більш простим, ніж векторне керування, за рахунок спрощеної структури математичної моделі. У його основі полягає розрахунок векторів моменту та потокозчеплення та розміщення їх у потрібному для нас напрямку. Як наслідок маємо можливість роздільного керування моментом та потоком асинхронного двигуна. Розрахунок моменту проводиться через отримане з давача значення струму статора. Перевагами перед векторним керуванням є відсутність потреби у використанні датчика швидкості, не вимагається перетворення координат та має більш просту схему керування. Системи, що використовують пряме керування моментом, можуть забезпечити астатичне регулювання моменту на низьких швидкостях обертання двигуна.

Принципом дії такої системи є порівняння заданого значення моменту з реальним, обрахунок похибки керування після чого проводиться мінімізація її значення шляхом обчислення оптимальної комбінації станів ключів інвертора.

Система автоматичного керування називається оптимальною, якщо в ній тим чи іншим способом забезпечується найкраще значення основного показника якості роботи. Цей показник називається критерієм оптимальності. Використання методів теорії оптимального керування є одним з найперспективніших способів підвищення якості систем автоматичного керування, що проектуються. Вимоги, що ставляться до системи, можна пов'язати з досягненням екстремуму деякої величини – показника якості роботи системи або критерію оптимальності. Таким показником може бути

цільова функція або функціонал. За рахунок мінімізації цільових функцій отримують оптимальні значення варійованих параметрів, або їх залежності від основних регульованих параметрів, що змінюються за заданим законом.

Найбільш популярними методами оптимального керування є методи, засновані на використанні аналітичних виразів для визначення різних видів втрат, наведених у попередньому параграфі. Такі методи поєднують в одну групу, яку називають Loss Model Control (LMC) – керування, засноване на моделях втрат.

Ефект від застосування методів мінімізації втрат енергії в усталених режимах буде суттєвим тільки для приводів, що досить часто працюють з майже постійним та невеликим моментом навантаження ($TL < 0.4T_n$), або з моментом навантаження, що змінюється повільно у тому ж діапазоні. Цей метод буде особливо актуальним при керуванні приводом локомотива, так як розгін з максимальним моментом займає відносно невелику долю часу у порівнянні з рухом із підтриманням сталої швидкості, де потребується значно менший момент для подолання сил тертя та аеродинамічного супротиву.

Висновки до розділу 2.

Серед сучасних алгоритмів керування асинхронним тяговим електроприводом скалярне керування відзначається простотою реалізації, але має обмежену точність регулювання та гірші динамічні характеристики при змінному навантаженні. Векторне керування забезпечує вищу якість регулювання, кращу керованість моментом і швидкістю та наближає асинхронний електропривод до характеристик привода постійного струму, однак є складнішим у реалізації та більш чутливим до точності алгоритмів і параметрів системи. З урахуванням вимог до тягового електропривода електропоїзда більш перспективним є застосування векторного керування, оскільки воно краще відповідає умовам роботи при частих пусках, змінному навантаженні та необхідності обмеження струмів пуску.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРАХУНКИ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ ЕЛЕКТРОПОЇЗДА

3.1 Розрахунок основних параметрів тягового асинхронного двигуна

Перед початком розрахунків визначимося з параметрами локомотива (магістрального пасажирського електровоза змінного струму) – зчіпна маса $m=100\text{т}$, конструкційна швидкість $v=100\text{км/год}$, максимальна швидкість – 160км/год , кількість приводних осей (кількість тягових електродвигунів) – 4. На початкових ділянках тягових характеристик максимальне значення сили тяги обмежується, як правило, зчепленням колії та рейки (величиною $P_{\text{сц}}$). Значення коефіцієнта зчеплення Ψ для різних типів локомотивів та умов експлуатації визначається за формулою:

$$\psi = a_{\psi} + \frac{b_{\psi}}{c_{\psi} + d_{\psi} \cdot v} - e_{\psi} \cdot v \quad (3.1)$$

Для нульової швидкості: $\psi = 0.36$, для швидкості 100 км/год : $\psi = 0.226$. Дотична сила тяги локомотива F_k в Н на ділянках обмежених по зчепленню визначається за формулою:

$$F = P \cdot \psi \quad (3.2)$$

$F_k = 342\text{ кН}$ для нульової швидкості, $F_k = 226\text{ кН}$ для швидкості 100 км/год .

P – зчіпна вага локомотива, Н; ψ – коефіцієнт зчеплення.

Для забезпечення необхідної сили тяги обираємо асинхронний тяговий електродвигун з короткозамкненим ротором СТА-1200У1, що має наступні параметри:

- Номінальна потужність: $P_N = 1200\text{ кВт}$,
- Кількість фаз статора: $m=3$,
- Число пар полюсів: $p=3$,
- Умовно номінальна частота мережі: 56.9 Гц ,
- Номінальна фазна напруга: $U_N = 1080\text{ В}$,
- Синхронна частота обертання: 1138 об/хв ,

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

- Номінальний момент на валу: 10070 Нм,
- Скольження в номінальному режимі роботи: 0.01,
- Фазний струм статора в номінальному режимі (діюче значення): 465 А,
- Коефіцієнт потужності: 0.833,
- Коефіцієнт корисної дії: 0.955, Параметри схеми заміщення:
- Активний опір фази обмотки статора: 0.033 Ом,
- Індуктивний опір фази обмотки статора: 0.228 Ом,
- Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора: 0.025 Ом,
- Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора: 0.24 Ом,
- Головний індуктивний опір: 5.4 Ом.

Передатне число тягового редуктора визначається після вибору тягового двигуна та розрахунку діаметру ведучих коліс. Передатне число μ визначають з умови руху поїзда з заданою швидкістю по формулі:

$$\mu = \frac{F \cdot D_K}{2M} = \frac{56.5 \cdot 1.25}{2 \cdot 10.07} = 3.5$$

- де F – тривала сила тяги одного колісно-моторного блоку, кН;
- D_K – діаметр колеса, м;
- M – тривалий момент на валу тягового електродвигуна, кНм.
- Тривала сила тяги одного колісно-моторного блоку визначається з виразу:

$$F = \frac{F_{KP}}{n} = \frac{226}{4} = 85.5 \text{ Н}$$

- де F_{KP} -розрахункова сила тяги електровоза, кН;
- n – кількість тягових електродвигунів на секцію локомотива.

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 56.9 = 357.5132 \text{ рад/с}$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_{HX} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{357.5132}{3} = 119.1711 \text{ рад/с}$$

Швидкість локомотива при номінальній частоті обертання:

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\omega_n = \omega_{HX}(1 - s_n) = 119.1711 \cdot (1 - 0.01) = 117.9794 \text{ рад/с}$$

Або у обертах за секунду:

$$n_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{153.46}{6.28} = 18.777 \text{ об/с}$$

Швидкість локомотива при номінальній частоті обертання:

$$v_n = \frac{n_n}{i_p} \Pi = \frac{18.777}{3.5} \cdot 3.95 = 21.19 \text{ м/с} = 76.28 \text{ км/год}$$

i_p - передатне число редуктора; $i_p = 3.5$; Π – периметр колеса:

$$\Pi = \pi D = 3.14 \cdot 1.25 = 3.95 \text{ м}$$

де D – діаметр колеса, $D=1,25$ м.

Частота обертання двигуна при максимальній швидкості:

$$\omega_{max} = \omega_n \frac{v_{max}}{v_n} = 117.97 \frac{120}{76.28} = 247.44 \text{ рад/с}$$

де v_{max} – максимальна швидкість локомотиву $v_{max}=160$ км/год;

Приведене значення моменту інерції електровозу ($m_{лок}=100$ т):

$$J_{\Pi} = m_{TP} \frac{R^2}{i_p^2} = 100 \frac{1.25^2}{3.5^2} = 12.755 \text{ тм}^2$$

Приведене значення моменту інерції локомотиву з 10 вагонами ($m_v = 60$ т):

$$J_{\Pi} = m_{TP} \frac{R^2}{i_p^2} = 700 \frac{1.25^2}{3.5^2} = 89.285 \text{ тм}^2$$

З врахуванням моменту інерції самого двигуна, приведені значення моменту інерції одного локомотиву на кожний двигун складає:

$$J'_{\Pi} \approx 3.188 \text{ тм}^2$$

приведене значення моменту інерції електровозу з 10 вагонами ($m_n = 700$ т):

$$J'_{\Pi} \approx 22.321 \text{ тм}^2$$

Момент двигуна, який відповідає тяговій силі локомотиву $F_{тяг} = 226$ кН:

$$M_T = \frac{F_{тяг} \cdot D}{2 \cdot z \cdot i_p} = \frac{226 \cdot 1.25}{2 \cdot 4 \cdot 3.5} = 10.089 \text{ кНм}$$

Маса локомотиву та вагонів відповідно дорівнює $P=100$ т, $Q=600$ т.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

3.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна є важливим етапом аналізу асинхронного електропривода, оскільки саме ця схема дозволяє з достатньою точністю описати електромагнітні процеси в двигуні в усталених і перехідних режимах роботи. На основі Т-подібної схеми визначають активні та індуктивні опори обмотки статора і ротора, а також параметри намагнічувальної гілки, що характеризують втрати енергії, розсіювання магнітного потоку та умови формування електромагнітного моменту. Отримані значення використовуються для побудови механічних і електромеханічних характеристик двигуна, оцінки пускових режимів, розрахунку струмів, моментів і коефіцієнта потужності, а також для подальшого моделювання роботи електропривода. Таким чином, розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення дає можливість перейти від загального опису двигуна до кількісного аналізу його режимів роботи та обґрунтувати вибір параметрів системи керування.

Перерахунок параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну проводиться наступним чином. Спочатку за відомими каталожними даними визначаються активні та індуктивні параметри статора, ротора та магнітної гілки, після чого виконується їх приведення до єдиної розрахункової структури. При цьому активний опір статора r_{1r_1r1} і індуктивний опір розсіювання статора x_{1x_1x1} у більшості випадків залишаються без змін, тоді як параметри роторного кола та намагнічувальної гілки уточнюються з урахуванням прийнятої схеми заміщення. Основна мета такого перерахунку полягає в тому, щоб отримати еквівалентні параметри, які забезпечують правильний опис електромагнітних процесів у двигуні та дозволяють надалі коректно будувати математичну модель.

Необхідність переходу саме до Т-подібної схеми пояснюється тим, що вона більш зручна для аналітичного опису асинхронного двигуна в задачах моделювання і синтезу систем керування. У цій схемі окремо виділяються

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметри статора, ротора та намагнічувального контуру, що дозволяє точніше враховувати взаємозв'язок між струмами, потокозчепленням і електромагнітним моментом. Крім того, Т-подібна схема краще узгоджується з рівняннями двигуна в координатних системах, що застосовуються при дослідженні перехідних процесів і розробці алгоритмів частотного керування. У результаті перерахунку отримуються значення параметрів, які надалі використовуються для побудови математичної моделі асинхронного двигуна, визначення струмів статора і ротора, розрахунку електромагнітного моменту, оцінки пускових режимів та моделювання роботи тягового електропривода в цілому. Таким чином, перехід від Г-подібної схеми заміщення до Т-подібної є необхідним етапом підготовки вихідних даних для подальших розрахунків і дослідження динаміки системи частотного керування тяговим асинхронним двигуном.

Основні електромагнітні процеси в асинхронному двигуні зручно описувати за допомогою Т-подібної схеми заміщення, у якій окремо враховуються параметри статорного, роторного та магнітного кіл. Така схема дозволяє визначати струми, втрати, потокозчеплення та електромагнітний момент двигуна в усталених і перехідних режимах, що зображено на рис. 3.1.

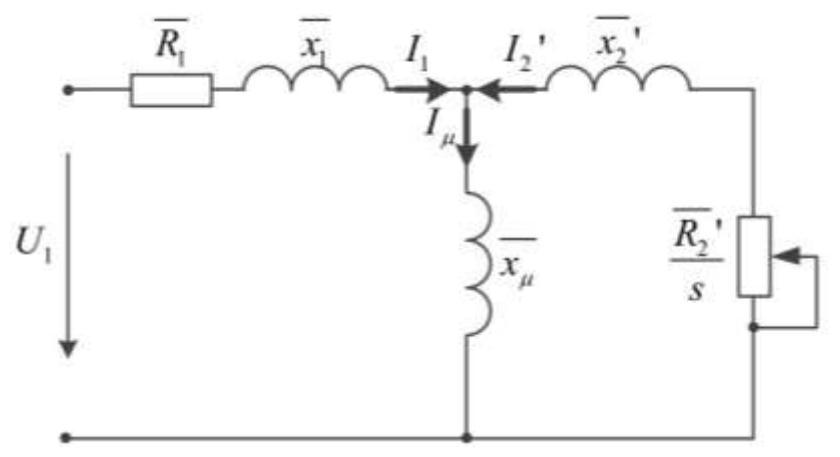


Рис. 3.1 Т-подібна схема заміщення АД

Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна використовується для спрощеного подання електромагнітних процесів у машині та зручна при визначенні каталожних і розрахункових параметрів. У цій схемі вхідна

напруга U_1 прикладається до статорного кола, яке характеризується активним опором R_1' та індуктивним опором розсіювання x_1' . Струм статора I_1 у вхідному вузлі розгалужується на струм намагнічування I_μ , що проходить через намагнічувальну гілку, та приведений струм ротора I_2'' , який протікає через роторне коло. Магнітна гілка враховує процес створення основного магнітного потоку та втрати в сталі, а роторне коло представлене індуктивним опором розсіювання x_2'' і активним опором R_2''/s , де s — ковзання двигуна.

Така побудова дає змогу аналізувати струми, втрати потужності, режим намагнічування та роботу двигуна при різних значеннях навантаження, що наведено на рис. 3.2.

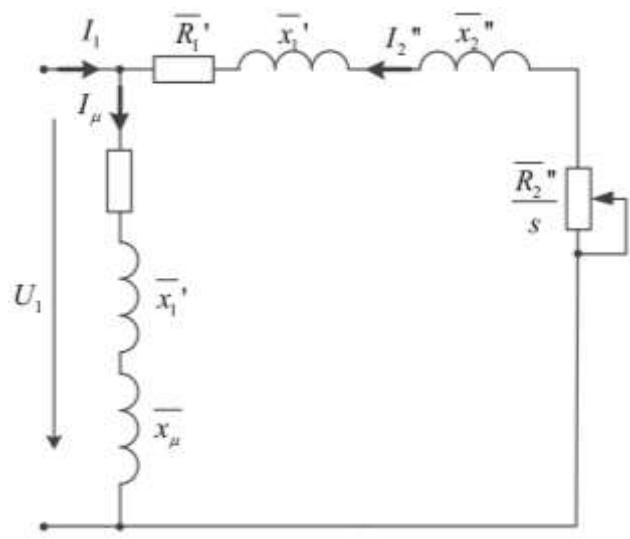


Рис. 3.2 Г-подібна схема заміщення АД

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення:

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}_1'\bar{x}_\mu}}{2\bar{x}_\mu} = \frac{5.392 + \sqrt{5.392^2 + 4 \cdot 0.228 \cdot 5.392}}{2 \cdot 5.392} = 1.0406$$

Коефіцієнт c_1 є допоміжним параметром перерахунку, який використовується для переходу від Г-подібної схеми заміщення до Т-подібної. Його значення визначається через параметри намагнічувального контуру та розсіювання статора і надалі використовується при уточненні активних та реактивних опорів схеми заміщення.

$$\overline{x_1} = \frac{\overline{x_1'}}{c_1} = \frac{0.228}{1.0406} = 0.2191, \overline{R_1} = \frac{\overline{R_1'}}{c_1} = \frac{0.033}{1.0406} = 0.0317$$

$$\overline{x_2'} = \frac{\overline{x_2''}}{c_1^2} = \frac{0.238}{1.0406^2} = 0.2198$$

$$\overline{R_2'} = \frac{\overline{R_2''}}{c_1^2} = \frac{0.025}{1.0406^2} = 0.0231$$

$$x_1 = \overline{x_1} \frac{U_n}{I_n} = 0.2191 \frac{1080}{465.5731} = 0.5082_{\text{ОМ}}$$

$$R_1 = \overline{R_1} \frac{U_n}{I_n} = 0.0317 \frac{1080}{465.5731} = 0.0736_{\text{ОМ}}$$

$$x_2' = \overline{x_2'} \frac{U_n}{I_n} = 0.2198 \frac{1080}{465.5731} = 0.5098_{\text{ОМ}}$$

$$R_2 = \overline{R_2'} \frac{U_n}{I_n} = 0.0231 \frac{1080}{465.5731} = 0.0536_{\text{ОМ}}$$

$$x_\mu = \overline{x_\mu} \frac{U_n}{I_n} = 5.392 \frac{1080}{465.5731} = 12.5079_{\text{ОМ}}$$

Отримані значення характеризують відповідно реактивний та активний опори статорного і роторного кіл у Т-подібній схемі заміщення. Ці параметри є основою для подальшого переходу до абсолютних одиниць.

Для практичного використання в математичній моделі та при моделюванні режимів роботи електропривода параметри схеми заміщення необхідно подати в абсолютних одиницях. Перерахунок виконується через номінальні значення напруги та струму двигуна.

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.5082}{357.5132} = 0.0014_{\text{Гн}}$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2'}{\omega_0} = \frac{0.5098}{357.5132} = 0.0014_{\text{Гн}}$$

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{12.5079}{357.5132} = 0.035_{\text{Гн}}$$

На основі знайдених реактивних опорів визначаються індуктивності розсіювання статора і ротора, а також індуктивність контуру намагнічування.

Саме ці параметри надалі використовуються при складанні математичної моделі асинхронного двигуна та аналізі його динамічних режимів. Повна індуктивність статорного кола визначається як сума індуктивності намагнічування та індуктивності розсіювання статора. Такий підхід дозволяє врахувати як основний магнітний потік машини, так і втрати, пов'язані з потоками розсіювання.

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.035 + 0.0014 = 0.0364 \text{ Гн}$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.035 + 0.0014 = 0.0364 \text{ Гн}$$

На основі проведених розрахунків визначаються допоміжні параметри математичної моделі асинхронного двигуна: α , β , γ , σ та μ_1 . Ці коефіцієнти характеризують співвідношення між активними опорами, індуктивностями статорного і роторного кіл, а також параметрами контуру намагнічування. Параметр α враховує вплив активного опору ротора, α_1 — активного опору статора, σ характеризує коефіцієнт розсіювання магнітного потоку, β визначає зв'язок між контуром намагнічування та роторним колом, γ є узагальненим коефіцієнтом, що враховує сумарний вплив активних і індуктивних параметрів статора, а μ_1 використовується при розрахунку електромагнітного моменту двигуна. Отримані значення цих параметрів надалі застосовуються при складанні рівнянь математичної моделі та моделюванні електромеханічних процесів асинхронного електропривода.

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.0536}{0.0364} = 1.4707 \text{ Ом/Гн}$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.0736}{0.0364} = 2.0205 \text{ Ом/Гн}$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} \right) = 0.0364 \left(1 - \frac{(0.035)^2}{0.0364 \cdot 0.0364} \right) = 0.0028 \text{ Гн}$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.035}{0.0364 \cdot 0.0028} = 344.1662 \text{ 1/Гн}$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.0188}{0.0028} + 2.0205 \cdot 0.035 \cdot 344.1662 = 44.0585 \text{ Ом/Гн}$$

$$\mu_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.035}{0.0364} = 1.4413$$

У ході виконаних розрахунків було розраховано зусилля при русі локомотива, що буде приводитись на кожен двигун. Після цього отримано потужність одного з чотирьох двигунів та проведено його вибір. В результаті було обрано двигун СТА-1200У1. Розраховано моменти інерції та опору рухомого складу.

Також було розраховано параметри двигуна, що будуть використані у наступних розділах для проведення моделювання.

Крім того, визначено допоміжні коефіцієнти α , α_1 , β , γ , σ та μ_1 , які використовуються при складанні математичної моделі асинхронного двигуна. Отримані результати є достатньою розрахунковою базою для подальшого моделювання електромеханічних процесів у системі частотного керування тяговим електроприводом.

3.3 Розрахунок параметрів частотного перетворювача

Для живлення тягового асинхронного двигуна СТА-1200У1 використовується частотний перетворювач з ланкою постійного струму та автономним інвертором напруги. Частотний перетворювач забезпечує зміну частоти та напруги живлення двигуна, завдяки чому здійснюється плавний пуск, регулювання швидкості та обмеження пускових струмів..

Для реалізації частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда необхідно визначити основні параметри частотного перетворювача, силового інвертора та проміжної ланки постійного струму. Частотний перетворювач у тяговому електроприводі виконує функцію узгодження параметрів електричної енергії з режимом роботи двигуна. Він повинен забезпечувати зміну частоти та напруги живлення двигуна, формування необхідного електромагнітного моменту, а також обмеження струмів у пускових і перехідних режимах.

У даній роботі для розрахунку приймається тяговий асинхронний двигун СТА-1200У1, параметри якого були визначені в попередньому підрозділі. Основні паспортні дані двигуна:

- номінальна потужність двигуна $P_n = 1200$ кВт;
- номінальна фазна напруга $U_\phi = 1080$ В;
- номінальний струм статора $I_n = 465$ А;
- коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0,833$;
- коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,955$;
- номінальна частота живлення $f_n = 56,9$ Гц;
- номінальний момент $M_n = 10070$ Н·м.

Розрахункова потужність частотного перетворювача визначається з урахуванням коефіцієнта запасу:

$$P_{FC} = k_z \cdot P_n \quad (3.3)$$

де P_{FC} — розрахункова потужність частотного перетворювача, кВт; k_z — коефіцієнт запасу; P_n — номінальна потужність двигуна, кВт.

Для тягових електроприводів приймаємо коефіцієнт запасу: $k_z = 1,15$

Підставимо числові значення:

$$P_{FC} = 1,15 \cdot 1200 = 1380 \text{ кВт}$$

Отже, розрахункова потужність частотного перетворювача повинна бути не меншою за 1380 кВт.

Частотний перетворювач для такого двигуна повинен вибиратися не тільки за активною потужністю, а й за повною потужністю, струмом, допустимою перевантажувальною здатністю та напругою силової частини. Це пов'язано з тим, що тяговий електропривод працює в режимах частих пусків, розгонів і змін навантаження, тому струмові перевантаження в ньому є більш жорсткими, ніж у звичайних промислових електроприводах.

Повна потужність, яку повинен забезпечувати частотний перетворювач, визначається за формулою:

$$S_{\text{спож}} = \frac{P_n}{\eta \cdot \cos\varphi}$$

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

де P_n — номінальна потужність двигуна, кВт; η — коефіцієнт корисної дії двигуна; $\cos\varphi$ — коефіцієнт потужності.

Підставимо числові значення:

$$S_{\text{спож}} = \frac{1200}{0,955 \cdot 0,833} = 1510,2 \text{ кВА}$$

Отже, повна потужність частотного перетворювача повинна бути не меншою за 1510,2 кВА.

Після визначення потужності частотного перетворювача необхідно розрахувати основні параметри силової частини. До таких параметрів відносяться номінальний струм інвертора, максимальний допустимий струм та напруга проміжної ланки постійного струму.

Номінальний струм інвертора повинен відповідати номінальному струму тягового двигуна. Для двигуна СТА-1200У1 номінальний струм статора становить 465 А.

$$I_{\text{інв.н}} = I_n \quad (3.4)$$

де $I_{\text{інв.н}}$ — номінальний струм інвертора, А; I_n — номінальний струм двигуна, А.

$$I_{\text{інв.н}} = 465 \text{ А}$$

Таким чином, номінальний струм інвертора приймаємо не менше 465 А. Під час пуску та розгону електропоїзда струм двигуна може бути більшим за номінальний. Тому інвертор необхідно вибирати із запасом по струму. Для тягового електропривода приймаємо коефіцієнт перевантаження $k_I = 2,5$.

$$I_{\text{інв.мах}} = k_I \cdot I_n \quad (3.5)$$

$$I_{\text{інв.мах}} = 2,5 \cdot 465 = 1162,5 \text{ А}$$

Отже, максимальний струм інвертора повинен бути не менше 1162,5 А. Для подальшого розрахунку приймаємо інвертор з допустимим короткочасним струмом 1200 А.

Далі визначаємо напругу проміжної ланки постійного струму. Вона повинна забезпечити отримання потрібної змінної напруги на виході

інвертора. Оскільки номінальна фазна напруга двигуна становить 1080 В, напругу ланки постійного струму приймаємо із запасом.

$$U_{dc} = k_U \cdot U_{\phi} \quad (3.6)$$

де U_{dc} — напруга ланки постійного струму, В; k_U — коефіцієнт запасу за напругою; U_{ϕ} — фазна напруга двигуна, В.

Приймаємо коефіцієнт запасу за напругою $k_U = 2,8$.

Підстановка:

$$U_{(dc)} = 2,8 \cdot 1080 = 3024 \text{ В}$$

Отримане значення округлюємо до зручного для подальших розрахунків:

$$U_{(dc)} = 3000 \text{ В}$$

Отже, для живлення одного тягового асинхронного двигуна СТА-1200У1 приймаємо частотний перетворювач із номінальним струмом не менше 465 А, максимальним короткочасним струмом 1200 А та напругою проміжної ланки постійного струму 3000 В.

Для подальшого вибору силової частини частотного перетворювача необхідно визначити параметри силових ключів. Основними параметрами є допустима напруга та струм. Оскільки інвертор працює від ланки постійного струму, напруга силових ключів повинна бути більшою за напругу цієї ланки.

Допустима напруга силових ключів визначається за формулою:

$$U_{кл} = k_z \cdot U_{dc} \quad (3.7)$$

$$U_{кл} = 1,5 \cdot 3000 = 4500 \text{ В}$$

Отже, для інвертора потрібно прийняти силові ключі з допустимою напругою не менше 4500 В.

Струм силових ключів приймається за максимальним струмом інвертора, який був визначений раніше. Для даного розрахунку:

$$I_{кл} = I_{інв.мах} = 1200 \text{ А}$$

Таким чином, для силової частини приймаємо ключі з параметрами не менше 4500 В та 1200 А.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Також визначимо струм у проміжній ланці постійного струму. Для спрощеного розрахунку приймаємо, що потужність у ланці постійного струму приблизно дорівнює розрахунковій потужності частотного перетворювача.

$$I_{dc} = P_{FC} \cdot \frac{1000}{U_{dc}} \quad (3.8)$$

де I_{dc} — струм ланки постійного струму, А; P_{FC} — розрахункова потужність частотного перетворювача, кВт; U_{dc} — напруга ланки постійного струму, В.

$$I_{dc} = 1380 \cdot \frac{1000}{3000} = 460 \text{ А}$$

Отже, струм проміжної ланки постійного струму для одного перетворювача становить приблизно 460 А.

Оскільки на електровозі використовується вісім тягових двигунів, сумарна потужність частотних перетворювачів визначається як добуток кількості двигунів на потужність одного перетворювача.

$$P_{\Sigma} = N_{дв} \cdot P_{FC} \quad (3.9)$$

де P_{Σ} — сумарна потужність силової частини, кВт; $N_{дв}$ — кількість тягових двигунів; P_{FC} — потужність одного частотного перетворювача, кВт.

$$P_{\Sigma} = 8 \cdot 1380 = 11040 \text{ кВт}$$

Отже, сумарна розрахункова потужність силової частини електровоза становить 11040 кВт.

За результатами виконаного розрахунку для одного тягового асинхронного двигуна СТА-1200У1 приймається частотний перетворювач потужністю 1380 кВт, з напругою ланки постійного струму 3000 В, силовими ключами на напругу не менше 4500 В та струм не менше 1200 А. Для восьми тягових двигунів сумарна потужність силової частини становить 11040 кВт.

Крім потужності, струму та напруги силової частини, для частотного перетворювача необхідно визначити діапазон вихідної частоти. Саме зміна частоти дозволяє регулювати швидкість тягового асинхронного двигуна.

Номінальна частота живлення двигуна СТА-1200У1 становить: $f_n=56,9$ Гц

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Для плавного пуску частотний перетворювач повинен забезпечувати зміну частоти від мінімального значення до номінального. У роботі приймаємо мінімальну частоту пуску:

$$f_{\text{min}} = 5 \text{ Гц}$$

Максимальну частоту приймаємо з невеликим запасом відносно номінальної частоти двигуна.

$$f_{\text{max}} = k_f \cdot f_n \quad (3.10)$$

де f_{max} — максимальна вихідна частота частотного перетворювача, Гц;
 k_f — коефіцієнт запасу за частотою; f_n — номінальна частота двигуна, Гц.

$$f_{\text{max}} = 1,15 \cdot 56,9 = 65,4 \text{ Гц}$$

Отже, частотний перетворювач повинен забезпечувати регулювання вихідної частоти приблизно в діапазоні від 5 до 65 Гц.

Для нормальної роботи асинхронного двигуна при частотному керуванні необхідно підтримувати приблизно постійне відношення напруги до частоти. Це дозволяє зберігати магнітний потік двигуна на допустимому рівні та уникати надмірного струму при пуску.

Коефіцієнт закону частотного керування визначається за формулою:

$$k = \frac{U_{\phi}}{f_n} = \frac{1080}{56,9} = 18,98 \frac{\text{В}}{\text{Гц}}$$

Отже, при частотному керуванні напруга повинна змінюватися приблизно з коефіцієнтом 18,98 В/Гц.

Таким чином, при частоті 10 Гц частотний перетворювач повинен формувати фазну напругу приблизно 190 В.

Підсумкові параметри частотного перетворювача для одного тягового двигуна СТА-1200У1 наведено нижче:

- розрахункова потужність частотного перетворювача — 1380 кВт;
- повна потужність — 1510,2 кВА;
- номінальний струм інвертора — 465 А;
- максимальний короткочасний струм — 1200 А;
- напруга ланки постійного струму — 3000 В;

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

- допустима напруга силових ключів — 4500 В;
- діапазон вихідної частоти — 5...65 Гц;
- коефіцієнт закону U/f — 18,98 В/Гц.

Отже, розрахований частотний перетворювач забезпечує живлення тягового асинхронного двигуна, плавну зміну частоти та напруги, а також створює умови для подальшого обмеження пускових струмів.

3.4 Розрахунок режимів обмеження струмів пуску

Під час пуску тягового асинхронного двигуна струм статора може значно перевищувати номінальне значення. Це небажано, тому що збільшується нагрівання обмоток, навантаження на силові ключі інвертора та елементи живлення. Тому в системі частотного керування передбачається обмеження пускового струму.

Для двигуна СТА-1200У1 номінальний струм статора становить:

$$I_n = 465 \text{ А}$$

У звичайному пусковому режимі без частотного керування пусковий струм асинхронного двигуна може становити приблизно 5–7 номінальних струмів. Для розрахунку приймаємо кратність пускового струму: $k_p=6$

Пусковий струм без обмеження визначається за формулою:

$$I_{\text{пуск}} = k_p \cdot I_n \quad (3.11)$$

де $I_{\text{пуск}}$ — пусковий струм без обмеження, А; k_p — кратність пускового струму; I_n — номінальний струм двигуна, А.

Отже, без обмеження пусковий струм може досягати приблизно 2790 А. Для частотно-керованого електропривода приймаємо обмеження пускового струму на рівні двох номінальних струмів.

$$I_{\text{обм}} = k_{\text{обм}} \cdot I_n \quad (3.12)$$

Приймаємо $I_{\text{обм}} = 2$, отже $I_{\text{обм}} = 2 \cdot 465 = 930 \text{ А}$

При використанні частотного керування пусковий струм обмежується 930 А.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Зменшення пускового струму визначимо як різницю між струмом без обмеження та струмом з обмеженням.

$$\Delta I = I_{\text{пуск}} - I_{\text{обм}} \quad (3.13)$$

Відносне зменшення пускового струму визначається за формулою:

$$\Delta_I = \left(\frac{\Delta I}{I_{\text{пуск}}} \right) \cdot 100 \quad (3.14)$$

$$\delta_I = \left(\frac{1860}{2790} \right) \cdot 100 = 66,7 \%$$

Отже, застосування частотного керування дозволяє зменшити пусковий струм приблизно на 66,7 %.

Для обмеження пускового струму в частотно-керованому електроприводі застосовується плавне підвищення частоти та напруги. При цьому напруга збільшується пропорційно частоті. Такий спосіб дозволяє зменшити різкий кидок струму на початку пуску.

Для двигуна СТА-1200У1 номінальна фазна напруга становить 1080 В, а номінальна частота — 56,9 Гц. Коефіцієнт пропорційності між напругою та частотою був визначений раніше.

$$k_{\frac{U}{f}} = \frac{1080}{56,9} = 18,98 \frac{\text{В}}{\text{Гц}}$$

Отже, для даного двигуна при зміні частоти на 1 Гц напруга повинна змінюватися приблизно на 18,98 В. Для початкового етапу пуску приймаємо частоту: $f_{\text{пуск}} = 10 \text{ Гц}$

Тоді напруга живлення двигуна при пуску визначається за формулою:

$$U_{\text{пуск}} = k_{\frac{U}{f}} \cdot f_{\text{пуск}} \quad (3.15)$$

Отже, при частоті 10 Гц фазна напруга живлення двигуна становить приблизно 190 В.

Для перевірки можна також визначити напругу при частоті 25 Гц.

$$U_f = 18,98 \cdot 25 = 474,5 \text{ В}$$

При частоті 25 Гц фазна напруга двигуна становить приблизно 474,5 В.

На номінальній частоті напруга досягає паспортного значення:

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

$$U_f = 18,98 \cdot 56,9 = 1080 \text{ В}$$

Таким чином, при частотному пуску напруга збільшується поступово разом із частотою. Це дозволяє обмежити пусковий струм до прийнятого значення 930 А та забезпечити більш плавний розгін тягового двигуна.

Для плавного пуску тягового асинхронного двигуна частота напруги живлення повинна збільшуватися не стрибком, а поступово. Це дозволяє зменшити пусковий струм і уникнути різкого механічного навантаження на тягову передачу.

У розрахунку приймаємо час пуску двигуна:

$$t_{\text{пуск}} = 20 \text{ с}$$

За цей час частота повинна змінитися від початкового значення до номінального. Початкову частоту приймаємо 10 Гц, а номінальна частота двигуна становить 56,9 Гц.

Темп наростання частоти визначається за формулою:

$$a_f = \frac{f_n - f_{\text{пуск}}}{t_{\text{пуск}}} \quad (3.16)$$

де a_f — темп наростання частоти, Гц/с; f_n — номінальна частота двигуна, Гц; $f_{\text{пуск}}$ — початкова частота пуску, Гц; $t_{\text{пуск}}$ — час пуску, с.

Підстановка:

$$a_f = \frac{56,9 - 10}{20} = 2,35 \frac{\text{Гц}}{\text{с}}$$

Отже, частота під час пуску повинна збільшуватися приблизно зі швидкістю 2,35 Гц/с.

Аналогічно можна визначити темп наростання напруги. Напруга змінюється від початкового значення 189,8 В до номінального значення 1080 В.

$$a_U = \frac{U_f - U_{\text{пуск}}}{t_{\text{пуск}}} \quad (3.17)$$

$$a_U = \frac{1080 - 189,8}{20} = 44,51 \frac{\text{В}}{\text{с}}$$

Отже, напруга під час пуску повинна збільшуватися приблизно зі швидкістю 44,51 В/с.

При такому способі керування частотний перетворювач не подає на двигун одразу повну напругу. Напруга та частота наростають поступово, тому струм статора не перевищує заданого обмеження. У даній роботі прийнято обмеження пускового струму:

$$I_{\text{обм}} = 930 \text{ А}$$

Таким чином, режим частотного пуску забезпечує плавний розгін тягового двигуна, зменшує пусковий струм та знижує навантаження на силову частину перетворювача.

Для оцінки ефективності обмеження пускового струму порівнюємо два режими: пуск без обмеження та пуск із використанням частотного керування. У першому випадку пусковий струм був визначений як:

$$I_{\text{пуск}} = 2790 \text{ А}$$

У другому випадку пусковий струм обмежується частотним перетворювачем:

$$I_{\text{обм}} = 930 \text{ А}$$

Коефіцієнт зменшення пускового струму визначається за формулою:

$$k_{\text{зм}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{обм}}} \quad (3.18)$$

де $k_{\text{зм}}$ — коефіцієнт зменшення пускового струму; $I_{\text{пуск}}$ — пусковий струм без обмеження, А; $I_{\text{обм}}$ — пусковий струм з обмеженням, А.

$$k_{\text{зм}} = \frac{2790}{930} = 3$$

Отже, при застосуванні частотного керування пусковий струм зменшується приблизно у 3 рази.

Для порівняння результатів складемо таблицю.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Таблиця 3.4 – Порівняння режимів пуску тягового асинхронного двигуна

Параметр	Пуск без обмеження	Пуск з обмеженням
Номінальний струм двигуна, А	465	465
Кратність пускового струму	6	2
Пусковий струм, А	2790	930
Час наростання частоти, с	—	20
Початкова частота, Гц	—	10
Номінальна частота, Гц	56,9	56,9
Характер пуску	різкий	плавний

З таблиці видно, що частотне керування дозволяє значно зменшити струм під час пуску. При прямому пуску струм може досягати 2790 А, а при використанні обмеження він не перевищує 930 А. Це зменшує електричне навантаження на обмотки двигуна та силові елементи частотного перетворювача.

Висновок до підрозділу 3.4. У підрозділі було розраховано режим обмеження пускового струму тягового асинхронного двигуна СТА-1200У1. Без обмеження пусковий струм може становити близько 2790 А. При використанні частотного керування струм обмежується до 930 А, тобто зменшується приблизно у 3 рази. Для забезпечення плавного пуску прийнято наростання частоти від 10 до 56,9 Гц за 20 с, а напруги — від 189,8 до 1080 В. Це дозволяє забезпечити більш м'який пуск електропривода та зменшити навантаження на силову частину.

3.5 Моделювання електропривода електропоїзда в MATLAB Simulink.

Для перевірки роботи системи частотного керування тяговим асинхронним двигуном було створено модель електропривода в середовищі MATLAB Simulink. Моделювання дозволяє оцінити роботу двигуна під час

пуску, розгону та виходу на усталений режим. Основна увага приділяється зміні струму статора, швидкості ротора та електромагнітного моменту.

Структурна схема моделі складається з таких основних частин: трифазного джерела живлення, блоку вимірювання напруги та струму, випрямляча, проміжної ланки постійного струму, інвертора, блока формування частоти, ШІМ-генератора, тягового асинхронного двигуна та вимірювальних блоків.

Трифазне джерело живлення імітує живлення силової частини електропривода. Після цього напруга подається на випрямляч, де змінна напруга перетворюється на постійну. Далі енергія надходить до ланки постійного струму, яка згладжує напругу та забезпечує живлення інвертора. Інвертор виконує зворотне перетворення постійної напруги у змінну трифазну напругу необхідної частоти. Саме через зміну частоти та амплітуди напруги здійснюється керування швидкістю тягового асинхронного двигуна. Для формування імпульсів керування інвертором використовується ШІМ-генератор.

Основні параметри моделі прийнято відповідно до розрахунків попередніх підрозділів:

- номінальна потужність двигуна — 1200 кВт;
- номінальна фазна напруга — 1080 В;
- номінальний струм статора — 465 А;
- номінальна частота — 56,9 Гц;
- номінальний момент — 10070 Н·м;
- напруга ланки постійного струму — 3000 В;
- обмежений пусковий струм — 930 А;
- час пуску — 20 с.

У моделі контролюються такі параметри: струм статора, струм ротора, напруга ротора, швидкість ротора, електромагнітний момент та кут ротора. Ці

величини виводяться на осцилографи Scope, що дозволяє оцінити характер перехідних процесів у тяговому електроприводі.

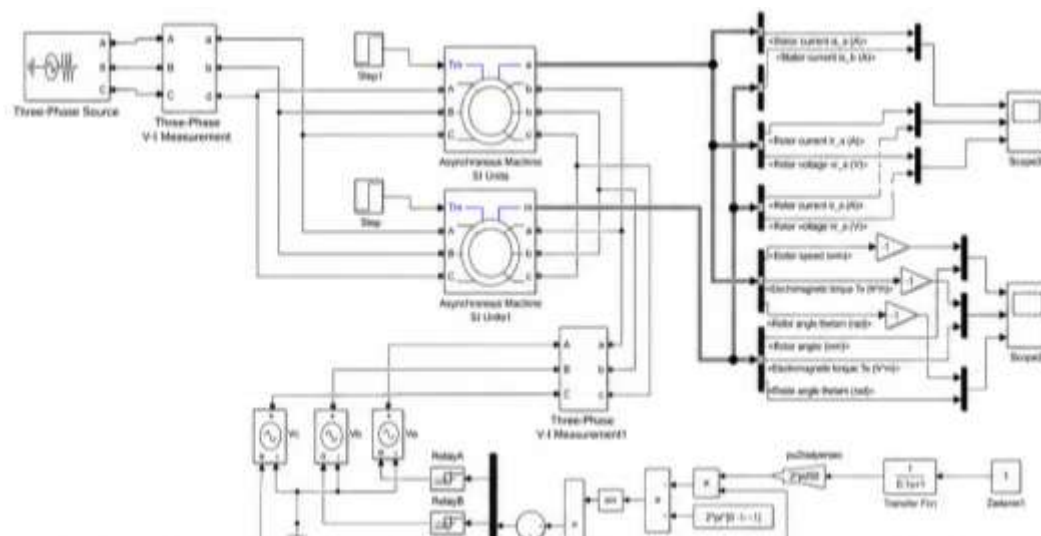


Рис. 3.4 Модель тягового асинхронного електродвигуна у середовищі Matlab Simulink

У моделі застосовано скалярний закон частотного керування, при якому підтримується приблизно постійне відношення напруги до частоти. Це дозволяє забезпечити плавний пуск двигуна та зменшити пусковий струм.

У моделі використовуються такі основні блоки:

- джерело живлення;
- випрямляч та ланка постійного струму;
- автономний інвертор напруги;
- блок частотного керування;
- тяговий асинхронний двигун;
- блок навантаження;
- вимірювальні блоки струму, моменту та швидкості.

Розроблена модель є основою для подальшого дослідження перехідних процесів у двигуні та аналізу теплового навантаження обмоток. На наступному етапі виконано моделювання режимів роботи двигуна та отримано графіки основних електромеханічних параметрів.

Після створення математичної моделі у середовищі Matlab Simulink виконано моделювання режимів роботи тягового електродвигуна. У процесі

моделювання досліджувалися зміни електромагнітного моменту, швидкості електропривода та струмів статора під час перехідних процесів.

Результати моделювання дозволяють оцінити характер роботи двигуна та визначити режими, при яких виникають найбільші електричні втрати і, відповідно, найбільше нагрівання обмоток.

Для оцінки перехідних процесів у тяговому електроприводі в MATLAB Simulink було отримано графіки зміни основних електромеханічних параметрів двигуна. На рисунку 3.5 наведено графіки струму статора, напруги ротора та електромагнітного моменту під час пуску та переходу двигуна в усталений режим роботи. На графіках можна оцінити характер зміни параметрів у початковий момент пуску, тривалість перехідного процесу та швидкість стабілізації системи.

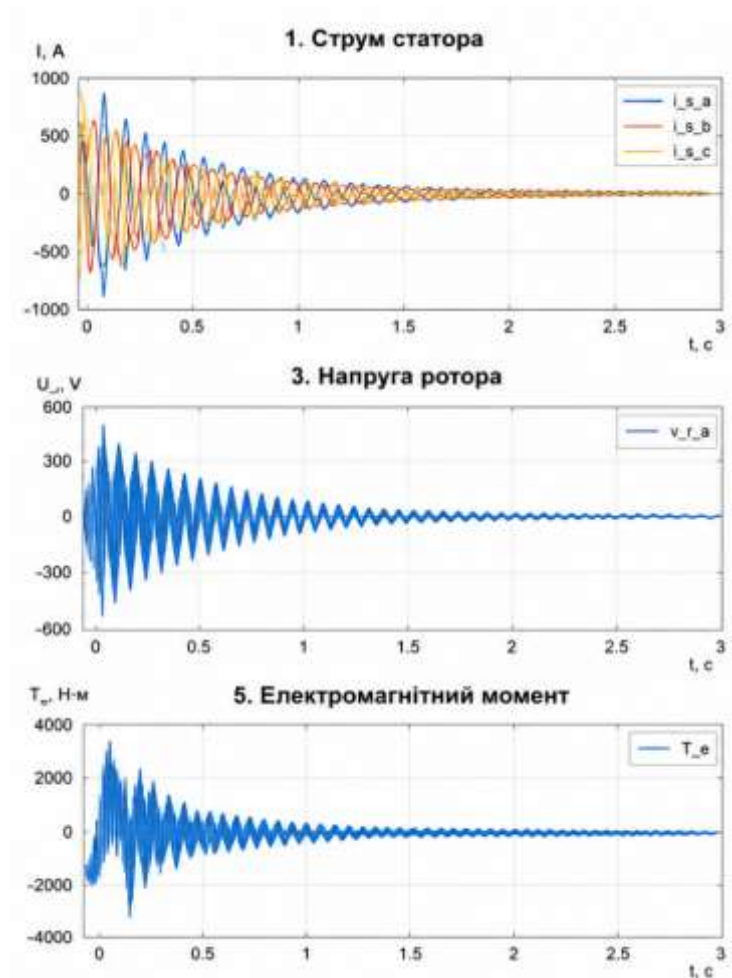


Рис. 3.5 Результати моделювання в усталений режим роботи

Аналіз графіків показує, що в початковий момент пуску спостерігаються значні коливання струму статора, напруги ротора та електромагнітного моменту. Це пояснюється наявністю перехідного процесу при запуску асинхронного двигуна.

На графіку струму статора видно, що найбільші значення струму виникають у початковий момент часу. Далі амплітуда коливань поступово зменшується, що свідчить про ефективне обмеження пускового струму та стабілізацію режиму роботи двигуна.

Графік напруги ротора також демонструє коливальний характер у початковий момент пуску. Після завершення перехідного процесу амплітуда напруги зменшується та система переходить у стійкий режим.

Електромагнітний момент на початку пуску має значні коливання, оскільки саме в цей момент двигун формує пускове тягове зусилля. Надалі коливання моменту поступово затухають, а його значення стабілізується.

З графіків видно, що приблизно після 1,5–2 секунд перехідний процес практично завершується, і система переходить у усталений режим роботи. Отримані результати підтверджують працездатність моделі електропривода та ефективність застосування частотного керування для обмеження пускових струмів.

Для подальшого аналізу перехідних процесів у MATLAB Simulink було отримано графіки струму ротора, швидкості обертання ротора та кута повороту ротора. Дані графіки дозволяють оцінити динаміку розгону тягового асинхронного двигуна та характер зміни механічних параметрів у процесі пуску.

На рисунку наведено відповідні графіки, отримані в результаті моделювання електропривода електропоїзда.

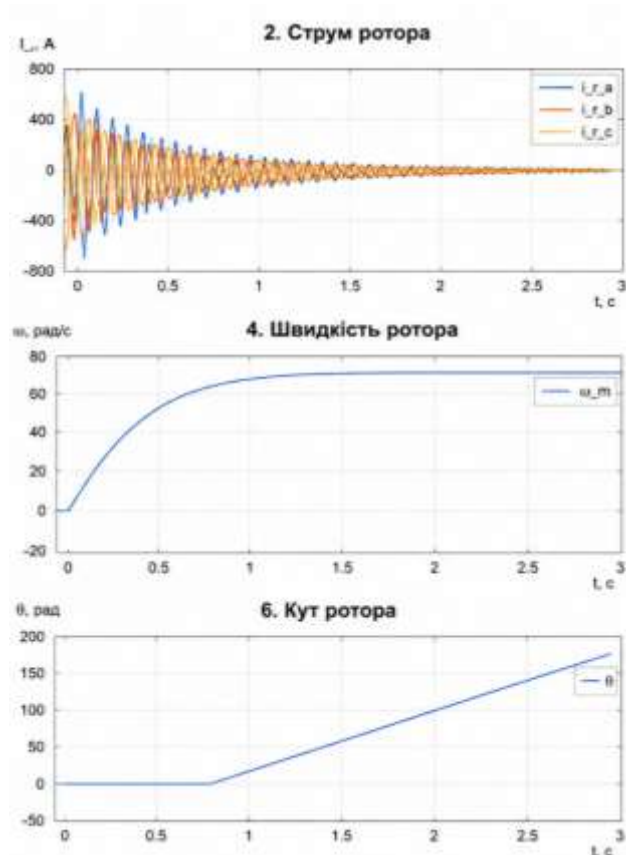


Рис. 3.6 Результати моделювання у перехідному режимі роботи

З аналізу отриманих графіків видно, що струм ротора в початковий момент пуску має значні коливання. Це характерно для перехідного режиму роботи асинхронного двигуна, коли відбувається формування електромагнітного поля та початкового тягового моменту. Надалі амплітуда коливань поступово зменшується, а система переходить у стабільний режим роботи.

Графік швидкості ротора показує плавний розгін двигуна від нульового значення до усталеного режиму. Швидкість зростає без різких стрибків, що свідчить про ефективну роботу системи частотного керування. Приблизно через 1,5 секунди швидкість досягає усталеного значення.

Графік кута ротора демонструє зміну положення ротора в часі. На початковому етапі кут змінюється незначно, що відповідає пусковому режиму. Після розгону двигуна кут ротора зростає практично лінійно, що свідчить про стабільну швидкість обертання.

Таким чином, результати моделювання показують, що система частотного керування забезпечує плавний пуск тягового асинхронного двигуна, ефективно обмеження пускових струмів та стабільний вихід електропривода на робочий режим.

У розділі 3 було виконано розрахунок основних елементів системи частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда. Для розрахунків прийнято тяговий асинхронний двигун СТА-1200У1 потужністю 1200 кВт, з номінальною фазною напругою 1080 В, струмом статора 465 А та номінальною частотою 56,9 Гц.

Виконано розрахунок параметрів частотного перетворювача. Для одного тягового двигуна прийнято перетворювач потужністю 1380 кВт, з напругою ланки постійного струму 3000 В, максимальним короткочасним струмом 1200 А та допустимою напругою силових ключів 4500 В. Для восьми тягових двигунів сумарна розрахункова потужність силової частини становить 11040 кВт.

Розраховано режим обмеження пускового струму. Без обмеження пусковий струм може досягати 2790 А, а при використанні частотного керування він обмежується до 930 А. Таким чином, пусковий струм зменшується приблизно у 3 рази, що знижує навантаження на обмотки двигуна та силові елементи перетворювача.

У MATLAB Simulink створено модель тягового електропривода з частотним керуванням. Результати моделювання показали, що під час пуску виникають перехідні коливання струму, напруги та електромагнітного моменту, які поступово затухають. Швидкість ротора плавно зростає та переходить до усталеного значення.

Отримані результати підтверджують, що застосування частотного керування забезпечує плавний пуск тягового асинхронного двигуна, обмеження пускових струмів та стабільну роботу електропривода електропоїзда.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Закон України про охорону праці визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян на охорону їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, регулює за участю відповідних державних органів відносини між власником підприємства, установи і організації або уповноваженим ним органом і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

Охорона праці – це система збереження життя і здоров'я працівників в процесі трудової діяльності, що включає в себе правові, соціально-економічні, організаційно-технічні, санітарно-гігієнічні, лікувально-профілактичні, реабілітаційні та інші заходи.

У дипломному проєкті розглянуті питання дослідження роботи припливної вентиляційної системи автомобільного стояночного бокса з використанням асинхронного двигуна змінного струму та частотно-регульованого електроприводу. Розв'язання цих технічних і експлуатаційних завдань здійснюється працівниками галузі електромеханіки та інженерної інфраструктури будівель, а саме їх виконує інженер-електромеханік.

Отже, розглянемо питання охорони праці на робочому місці інженера-електромеханіка, яке розташоване у технічній зоні будівлі стояночного бокса, на першому поверсі, на території підприємства, поблизу основного під'їзду для транспортних засобів. Працівник, виконуючи обслуговування вентиляційної установки, електродвигуна та частотного перетворювача, здійснює свою діяльність на фірмі, що експлуатує стояночний бокс та забезпечує його технічне утримання. Таким чином, доцільно розглянути організацію та управління охороною праці на підприємстві загалом, а в електротехнічному підрозділі — більш детально.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.1 Організація та управління охороною праці

Організація та управління охороною праці на підприємстві здійснюється відповідно до Закону України «Про охорону праці», який визначає обов'язки роботодавця, порядок функціонування служби охорони праці, вимоги до створення безпечних умов праці та відповідальність сторін. Загальне керівництво системою безпеки здійснює роботодавець, а практичне забезпечення покладено на службу охорони праці, створення якої передбачено ст. 15 Закону України «Про охорону праці» та Типовим положенням про службу охорони праці (НПАОП 0.00-4.35-04).

У підрозділі, де працює інженер-електромеханік, управління охороною праці базується на проведенні обов'язкових інструктажів та навчання, що регламентовані НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці». Працівник проходить вступний, первинний і повторний інструктажі, а також спеціальну підготовку та перевірку знань з електробезпеки відповідно до Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98).

Забезпечення наявності інструкцій з охорони праці, їх затвердження та перегляд здійснюється згідно з НПАОП 0.00-4.15-98 «Положення про розробку інструкцій з охорони праці», а ведення журналів обліку інструктажів — згідно з вимогами НПАОП 0.00-4.12-05.

Контроль за станом охорони праці на підприємстві здійснюється через трьохступеневий контроль, що передбачений Система управління охороною праці (СУОП) та типовими галузевими положеннями. Такий контроль включає щоденний оперативний нагляд керівників, періодичні перевірки в підрозділах та комплексну оцінку стану безпеки, що здійснюється комісією з охорони праці, діяльність якої регламентована ст. 41 Закону України «Про охорону праці».

Працівник проходить медичні огляди відповідно до Наказу МОЗ №246, а також професійний відбір для робіт підвищеної небезпеки згідно Переліку

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

робіт з підвищеною небезпекою (НПАОП 0.00-8.24-19). Спеціальне навчання та допуск до робіт здійснюються відповідно до Порядку НПАОП 0.00-4.12-05 та вимог з електробезпеки НПАОП 40.1-1.21-98.

Окремо організовано заходи з цивільного захисту, які відповідають вимогам Кодексу цивільного захисту України, включають оповіщення персоналу про повітряні тривоги, порядок переходу до укриття та інструкції дій у разі ракетної загрози. Додатково враховано ризик перебування у боксі вантажного транспорту, що може бути частиною військової логістики, тому роботодавець забезпечує виконання працівниками заходів безпеки під час повітряних тривог згідно з вимогами КЦЗУ (ст. 21, ст. 32).

Таким чином, система управління охороною праці на підприємстві та у технічному підрозділі формується на основі чинних нормативних актів і забезпечує належну організацію контролю, підготовку персоналу, профілактику ризиків і безпечні умови роботи.

4.2 Аналіз умов праці та розрахунок пристрою заземлення

Згідно з ДБН В.2.5-28:2018 та ДСН 3.3.6.042-99, найменша нормована освітленість у технічних приміщеннях становить 30 лк, а найбільша — 5000 лк. Зорова робота інженера-електромеханіка належить до робіт середньої точності, оскільки включає зчитування показів приладів, контроль параметрів електропривода та стану контактів. Тому нормований рівень освітлення становить 200–300 лк.

У повітрі на робочому місці інженера відсутні специфічні токсичні речовини, однак присутні побутовий пил, вихлопні гази транспортних засобів та аерозолі паливно-мастильних матеріалів. Це потребує визначення гранично допустимих концентрацій для найбільш характерних речовин у повітрі робочої зони.

Важкість праці інженера визначається його обов'язками — оглядом обладнання, виконанням ППР, роботою у нахилі та інколи на висоті.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 були визначені оптимальні та допустимі параметри мікроклімату, наведені в таблиці.

Таблиця 4.1 – Мікрокліматичні параметри для робочого місця інженера-електромеханіка. (ДСН 3.3.6.042-99 “Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень”)

Період року	Параметр	Оптимальні значення	Допустимі значення
Холодний період	Температура повітря	18–22 °С	16–24 °С
	Відносна вологість	40–60 %	до 75 %
	Швидкість руху повітря	до 0,2 м/с	до 0,3 м/с
Теплий період	Температура повітря	22–25 °С	20–28 °С
	Відносна вологість	40–60 %	до 70 %
	Швидкість руху повітря	до 0,3 м/с	до 0,5 м/с

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації (ГДК) речовин у повітрі робочої зони, (ДСН 3.3.6.039-99)

Речовина	Джерело у боксі	ГДК, мг/м ³	Характер впливу
Пил неорганічний без специфічної дії	побутовий пил, будівельні поверхні	4,0	подразнення дихальних шляхів
Оксид вуглецю (СО)	вихлопні гази авто	20,0	токсична дія, гіпоксія
Вуглеводні (пари бензину)	баки авто, паливні залишки	100,0	подразнення, токсична дія

Діоксид азоту (NO ₂)	робота ДВЗ у приміщенні	2,0	токсична дія, подразнення слизових
Аерозолі мастильних матеріалів	вентиляційні вузли, технічні рідини	5,0	подразнення дихальних шляхів

В даному індивідуальному завданні треба провести розрахунок заземлення вертикальними заземлювачами трубчастого виду в однорідному ґрунті з'єднаних горизонтальною смугою. Нижче вказані дані, на основі яких буде проводитися розрахунок.

Таблиця 4.4 – Вхідні дані для розрахунку захисного заземлення.

Питомий опір ґрунту ρ , Ом*м	500
Коефіцієнт кратності z	2
Довжина вертикального заземлювача l_1 , м	2,5
Діаметр вертикального заземлювача d_1 , м	0,05
Заглиблення вертикального заземлювача t_1 , м	2,5
Довжина горизонтального заземлювача l_2 , м	2,5
Діаметр горизонтального заземлювача d_2 , м	0,05
Заглиблення горизонтального заземлювача t_2 , м	1,5

Нижче будуть проведені необхідні розрахунки. Визначаємо опір вертикального заземлювача R_v .

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi l_1} * \left(\ln \frac{2l_1}{d_1} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t_1 + l_1}{4t_1 - l_1} \right) \quad (4.1)$$

де ρ – питомий опір ґрунту; l_1 – довжина вертикального заземлювача; d_1 – діаметр вертикального заземлювача; t_1 – заглиблення вертикального заземлювача.

$$R_B = \frac{500}{6,28 * 2,5} * \left(\ln \frac{2 * 2,5}{0,05} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 * 2,5 + 2,5}{4 * 2,5 - 2,5} \right) = 154,776 \text{ Ом}$$

Визначаємо кількість заземлювачів, після чого округляємо до найближчого табличного.

$$n_{\text{предв}} = \frac{R_B}{4} \quad (4.2)$$

де R_B – опір вертикального заземлювача.

$$n_{\text{предв}} = \frac{154,776}{4} = 38,694 = 40$$

Визначаємо довжину з'єднувальної полоси $L_{\text{с.п.}}$.

$$L_{\text{с.п.}} = z * l_B * n \quad (4.3)$$

де z – коефіцієнт кратності; l_B – довжина вертикального стержня,

n – кількість вертикальних стержнів.

$$L_{\text{с.п.}} = 2 * 2,5 * 40 = 200 \text{ м}$$

Визначаємо опір горизонтального заземлювача R_G .

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi l_2} * \ln \frac{2L_{\text{с.п.}}^2}{d_2 t_2} \quad (4.4)$$

де ρ – питомий опір ґрунту; $L_{\text{с.п.}}$ – довжина з'єднувальної полоси; l_2 – довжина горизонтального заземлювача; d_2 – діаметр горизонтального заземлювача,

t_2 – заглиблення горизонтального заземлювача.

$$R_G = \frac{500}{6,28 * 2,5} * \ln \frac{2 * 200 * 200}{0,05 * 1,5} = 442,036 \text{ Ом}$$

Далі підбираємо коефіцієнти використання горизонтальних та вертикальних стержнів на основі числа вертикальних стержнів (40) та коефіцієнту кратності (2). Таким чином, при заданих параметрах, η_B та η_G будуть дорівнювати 0,58 та 0,29 відповідно.

Знаходимо еквівалентний опір розтікання струму групового заземлювача $R_{\text{Гр.}}$.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_{\text{ГР}} = \frac{R_{\text{В}} R_{\text{Г}}}{R_{\text{В}} \eta_{\text{Г}} + R_{\text{Г}} \eta_{\text{В}} n} \quad (4.5)$$

де $R_{\text{В}}$ – опір вертикального заземлювача; $R_{\text{Г}}$ – опір горизонтального заземлювача; $\eta_{\text{В}}$ – коефіцієнт використання вертикальних стержнів; $\eta_{\text{Г}}$ – коефіцієнт використання горизонтальних стержнів; n – кількість вертикальних стержнів.

$$R_{\text{ГР}} = \frac{154,776 * 442,036}{154,776 * 0,29 + 442,036 * 0,58 * 40} = 6,6423 \text{ Ом}$$

Значення значно більше ніж необхідні 4 Ом, тому необхідно збільшити кількість вертикальних стержнів до 60. Нижче будуть проведені повторні обчислення.

$$R_{\text{ГР}} = \frac{154,776 * 442,036}{154,776 * 0,27 + 442,036 * 0,55 * 60} = 4,677 \text{ Ом}$$

Значення все одно більше ніж необхідні 4 Ом, тому необхідно збільшити кількість вертикальних стержнів до 100. Нижче будуть проведені повторні обчислення.

$$R_{\text{ГР}} = \frac{154,776 * 442,036}{154,776 * 0,23 + 442,036 * 0,52 * 100} = 2,97 \text{ Ом}$$

Даний результат хоч і значно, але менший, ніж 4 Ом, тщо відповідає вимогам безпеки.

4.4 Заходи з охорони праці

Оскільки працівник є інженером-електромеханіком, а його робоче місце було визначено у технічній зоні, у будівлі підприємства, на першому поверсі, то заходи з охорони праці будуть націлені на забезпечення електробезпеки, нормованих умов мікроклімату, освітлення та безпечної експлуатації вентиляційного обладнання.

Технічні заходи включають належне заземлення електрообладнання, застосування автоматичного захисту (автоматичні вимикачі, УЗО, теплові

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реле), підтримання працездатності вентиляційної системи та періодичний контроль стану кабельних ліній.

Організаційні заходи передбачають проведення інструктажів, ведення документації з охорони праці, регламентацію робіт підвищеної небезпеки та дотримання встановлених норм мікроклімату і освітленості.

Крім того, безпека пов'язаних із воєнними діями, ракетними ударами та повітряними тривогами, забезпечуються виконанням визначеного порядку евакуації персоналу, своєчасним переходом до укриття та організацією оповіщення працівників. Безпека досягається також за рахунок огляду обладнання після відбою тривоги та врахування ризику перебування залізничного транспорту, що може бути задіяний у стратегічних військових перевезеннях.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Техніко-економічне провадження.

У розділі виконується обґрунтування доцільності впровадження системи частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда з обмеженням струмів пуску. Необхідність такого обґрунтування пов'язана з тим, що запропоноване технічне рішення впливає не лише на електромеханічні показники привода, але й на загальні експлуатаційні витрати, надійність роботи обладнання та умови його технічного обслуговування.

Капітальні витрати на впровадження системи частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда визначаються як сукупність одноразових витрат, необхідних для придбання, монтажу, налаштування та введення в експлуатацію нового обладнання. У межах даної роботи розрахунок виконується в укрупненому вигляді, без надмірної деталізації окремих кошторисних позицій, оскільки основною метою є визначення загальної економічної доцільності впровадження запропонованого технічного рішення.

До складу капітальних витрат доцільно включати вартість силового перетворювача частоти, вартість елементів системи керування та вимірювання, витрати на монтаж, налагодження та інші супутні витрати, пов'язані з впровадженням системи. У загальному вигляді капітальні витрати можна визначити за формулою

За відсутності точних кошторисних даних у дипломному проєкті допускається використання укрупнених нормативних оцінок. При цьому інші додаткові витрати можуть враховувати витрати на транспортування, підготовку місця встановлення, допоміжні матеріали та організаційні заходи, пов'язані з введенням системи в експлуатацію. Такі витрати також доцільно приймати у відсотках від вартості основного обладнання або від загальної суми прямих витрат.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, розрахунок капітальних витрат на впровадження системи частотного керування виконується як визначення суми одноразових витрат, необхідних для реалізації запропонованого технічного рішення. Отримане значення надалі використовується при порівнянні базового і нового варіантів електропривода, а також при розрахунку річної економічної ефективності та строку окупності.

Разом з тим слід зазначити, що запропоноване рішення дає і супутні технічні переваги, зокрема зменшення пускових перевантажень, підвищення ресурсу обладнання та покращення плавності розгону, які не завжди можуть бути повністю враховані прямим вартісним розрахунком на даному етапі.

5.2 Визначення капітальних витрат на впровадження

Капітальні витрати на впровадження системи частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда визначаються як сукупність одноразових витрат, необхідних для придбання, монтажу, налагодження та введення в експлуатацію нового обладнання. У даній роботі розрахунок виконується в укрупненому вигляді, що дозволяє оцінити загальну економічну доцільність запропонованого рішення без надмірної деталізації кошторису.

До складу капітальних витрат включаються витрати на придбання основного обладнання, витрати на монтаж, налагодження та супутні витрати. Загальна величина капітальних витрат визначається за формулою:

$$K = K_{об} + K_{м} + K_{н} + K_{д}, \quad (5.1)$$

де $K_{об}$ — витрати на придбання основного обладнання;

$K_{м}$ — витрати на монтаж;

$K_{н}$ — витрати на налагодження і введення в експлуатацію;

$K_{д}$ — додаткові витрати.

Вартість основного обладнання визначається як:

$$K_{об} = K_{пч} + K_{ск} + K_{вим} + K_{доп} \quad (5.2)$$

де $K_{пч}$ — вартість перетворювача частоти;

$K_{ск}$ — вартість системи керування;

Квим — вартість вимірювальних засобів;

Кдоп — вартість допоміжного обладнання.

Для подальшого розрахунку прийемо такі орієнтовні витрати на один комплект системи частотного керування:

Таблиця 5.1 – Капітальні витрати на впровадження системи частотного керування

Найменування витрат	Позначення	Вартість, грн
Перетворювач частоти	Кпч	980000
Система керування	Кск	120000
Засоби вимірювання та датчики	Квим	45000
Допоміжне обладнання	Кдоп	35000
Разом вартість обладнання	Коб	1180000

Монтажні витрати доцільно прийняти у розмірі 8 % від вартості обладнання:

$$K_m = 0.08 \cdot K_{об} = 0.08 \cdot 1180000 = 94400 \text{ грн.}$$

Витрати на налагодження і введення в експлуатацію приймаються на рівні 5 % від вартості обладнання:

$$K_n = 0.05 \cdot K_{об} = 0.05 \cdot 1180000 = 59000 \text{ грн.}$$

Додаткові витрати, пов'язані з транспортуванням, підготовкою місця встановлення та допоміжними матеріалами, приймаються у розмірі 3 % від вартості обладнання:

$$K_d = 0.03 \cdot K_{об} = 0.03 \cdot 1180000 = 35400 \text{ грн.}$$

Тоді загальна величина капітальних витрат становитиме, К.

$$K = 1180000 + 94400 + 59000 + 35400 = 1368800 \text{ грн.}$$

Отже, орієнтовні капітальні витрати на впровадження системи частотного керування тяговим асинхронним двигуном становлять К=1368800 грн.

Отримане значення надалі використовується при визначенні експлуатаційних витрат, річного економічного ефекту та строку окупності.

Слід зазначити, що, окрім прямих економічних результатів, запропоноване рішення забезпечує і супутні вигоди, які складно повністю врахувати на даному етапі розрахунку. До них належать зменшення пускових перевантажень, підвищення ресурсу силового обладнання, покращення теплового режиму двигуна та зменшення динамічних навантажень на механічну передачу.

5.2 Розрахунок експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів

Експлуатаційні витрати визначаються для двох варіантів роботи тягового електропривода: базового, у якому не використовується запропонована система частотного керування з обмеженням струмів пуску, та нового, у якому така система впроваджується. У даному розрахунку до складу експлуатаційних витрат доцільно включити витрати на електроенергію, технічне обслуговування та поточний ремонт. Саме ці складові найбільш чутливо реагують на зміну режимів роботи електропривода та дають можливість оцінити прямий економічний ефект від модернізації.

Річні експлуатаційні витрати визначаються за формулою:

$$\text{Сексп} = \text{Сел} + \text{Сто} + \text{Ср}, \quad (5.3)$$

де Сел — річні витрати на електроенергію;

Сто — річні витрати на технічне обслуговування;

Ср — річні витрати на поточний ремонт.

Витрати на електроенергію можна визначити за формулою

$$\text{Сел} = W \cdot T, \quad (5.4)$$

де W — річне споживання електроенергії, кВт·год;

T — тариф на електроенергію, грн/кВт·год.

Для укрупненого розрахунку приймемо, що в базовому варіанті річне споживання електроенергії становить 420000 кВт·год, а після впровадження системи частотного керування знижується на 8 % і становить

$$W_{\text{нов}} = 420000 \cdot 0.92 = 386400 \text{ кВт}$$

Приймемо тариф на електроенергію, $T=6.50$ грн/кВт

Тоді для базового варіанта витрати на електроенергію становитимуть

$$\text{Сел.б} = 420000 \cdot 6.50 = 2730000 \text{ грн,}$$

Для нового варіанта, це становитиме:

$$\text{Сел.н} = 386400 \cdot 6.50 = 2511600 \text{ грн.}$$

Економія витрат на електроенергію дорівнює:

$$\Delta \text{Сел} = 2730000 - 2511600 = 218400 \text{ грн.}$$

Окрім зменшення споживання електроенергії, впровадження системи частотного керування сприяє зниженню пускових перевантажень, покращенню теплового режиму двигуна та зменшенню навантаження на силову і механічну частини привода. Це дозволяє зменшити витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт. Для укрупненого розрахунку приймемо, що в базовому варіанті річні витрати на технічне обслуговування становлять 160000 грн, а річні витрати на поточний ремонт — 140000 грн. Для нового варіанта відповідні витрати зменшуються і становлять 135000 грн та 115000 грн.

Отже, експлуатаційні витрати базового варіанта становитимуть

$$\text{Сексп.б} = 2730000 + 160000 + 140000 = 3030000 \text{ грн,}$$

а експлуатаційні витрати нового варіанта:

$$\text{Сексп.н} = 2511600 + 135000 + 115000 = 2761600 \text{ грн.}$$

Зменшення річних експлуатаційних витрат дорівнює:

$$\Delta \text{Сексп} = 3030000 - 2761600 = 268400 \text{ грн.}$$

Для зручності результати розрахунку наведемо в таблиці.

Таблиця 5.2 – Експлуатаційні витрати для базового і нового варіантів

Стаття витрат	Базовий варіант, грн	Новий варіант, грн
Витрати на електроенергію	2730000	2511600
Технічне обслуговування	160000	135000
Поточний ремонт	140000	115000
Разом експлуатаційні витрати	3030000	2761600

Таким чином, впровадження системи частотного керування забезпечує зменшення річних експлуатаційних витрат на: $\Delta \text{Сексп}=268400$ грн.

Отримане значення надалі використовується для визначення річної економічної ефективності та строку окупності запропонованого технічного рішення. При цьому слід зазначити, що наведений розрахунок враховує лише прямі витрати. Додатковий позитивний ефект очікується також за рахунок супутніх переваг, зокрема підвищення ресурсу обладнання, зменшення аварійності та покращення плавності роботи тягового електропривода.

5.3 Розрахунок річної економічної ефективності та строку окупності

Річна економічна ефективність упровадження системи частотного керування визначається на основі зменшення річних експлуатаційних витрат у порівнянні з базовим варіантом. У попередньому підрозділі було встановлено, що річні експлуатаційні витрати для базового варіанта становлять 3030000 грн, а для нового варіанта — 2761600 грн. Отже, річна економія дорівнює

$$\text{Еріч} = \text{Сексп.б} - \text{Сексп.н}, \quad (5.5)$$

$$\text{Еріч} = 3030000 - 2761600 = 268400 \text{ грн.}$$

Таким чином, упровадження системи частотного керування забезпечує річний економічний ефект у розмірі: $\text{Еріч}=268400$ грн.

Строк окупності капітальних витрат визначається як відношення загальної величини одноразових витрат на впровадження до річного економічного ефекту

$$\text{Ток} = \text{К} / \text{Еріч}, \quad (5.6)$$

де К — капітальні витрати на впровадження системи частотного керування, грн; Еріч — річна економічна ефективність, грн.

Підставляючи отримані раніше значення отримаємо:

$$\text{Ток} = 1368800 / 268400 = 5.10 \text{ роки.}$$

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, орієнтовний строк окупності запропонованого технічного рішення становить близько 5.1 року. Для наочності результати розрахунку доцільно звести в таблицю.

Таблиця 5.3 Зведені прогнозовані економічні показники

Показник	Позначення	Значення
Капітальні витрати	(К)	1368800 грн
Річні експлуатаційні витрати базового варіанта	(С_експ.б)	3030000 грн
Річні експлуатаційні витрати нового варіанта	(С_експ.н)	2761600 грн
Річна економія	(Е_річ)	268400 грн
Строк окупності	(Ток)	5.1 року

Отримані результати свідчать, що впровадження системи частотного керування тяговим асинхронним двигуном є економічно доцільним. Основний ефект досягається за рахунок зниження витрат на електроенергію, технічне обслуговування та поточний ремонт. Разом з тим слід враховувати, що наведений розрахунок відображає лише прямі економічні результати. Додатковий позитивний ефект можуть забезпечити супутні переваги, які важко точно оцінити на етапі дипломного проєктування, а саме: зменшення пускових перевантажень, покращення теплового режиму двигуна, підвищення ресурсу силового обладнання та зниження динамічних навантажень на механічну передачу. У сукупності ці фактори додатково підвищують доцільність упровадження запропонованого рішення.

Висновки

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання проектування системи частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда з обмеженням струмів пуску. У процесі виконання роботи проаналізовано особливості роботи електропоїзда як об'єкта тягового електроприводу, умови експлуатації тягових асинхронних двигунів та основні вимоги до системи їх керування. Показано, що для сучасного тягового електроприводу важливими є плавність пуску, зменшення струмових перевантажень, підвищення енергоефективності та зниження навантажень на силове і механічне обладнання.

У роботі виконано аналіз існуючих систем керування тяговими двигунами та встановлено, що найбільш доцільним рішенням для сучасного електропоїзда є використання частотно-регульованого асинхронного електропривода. Така система забезпечує ширші можливості регулювання, кращі динамічні характеристики та вищу енергоефективність у порівнянні з реостатно-контакторними і тиристорно-імпульсними системами.

У розрахунково-конструкторській частині визначено основні параметри тягового асинхронного двигуна, розраховано параметри Т-подібної схеми заміщення та отримано необхідні дані для побудови математичної моделі електропривода. На основі виконаних розрахунків побудовано імітаційну модель електропривода локомотива в середовищі MATLAB Simulink, яка дозволила дослідити процеси пуску, розгону та зміни навантаження при різних масі рухомого складу.

За результатами моделювання встановлено, що плавне наростання завдання моменту забезпечує м'який розгін електропривода без надмірних струмових перевантажень. Порівняння досліджених стратегій керування показало, що стратегія «максимальний момент на ампер» забезпечує менший модуль струму при однаковому завданні на момент, ніж стратегія мінімізації

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

втрат у міді. Це дозволяє вважати її більш доцільною для режимів пуску та розгону тягового асинхронного електропривода електропоїзда.

У техніко-економічній частині встановлено, що впровадження системи частотного керування є економічно доцільним. Економічний ефект досягається за рахунок зниження витрат на електроенергію, технічне обслуговування і поточний ремонт. Додатковими перевагами запропонованого рішення є зменшення пускових перевантажень, підвищення ресурсу силового обладнання та покращення плавності роботи електропривода.

Отже, поставлена в роботі мета досягнута. Запропонована система частотного керування тяговим асинхронним двигуном електропоїзда з обмеженням струмів пуску забезпечує належні динамічні показники, знижує струмові перевантаження в пускових режимах та може бути рекомендована для використання в сучасних тягових асинхронних електроприводах електропоїздів.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Теорія електроприводу" спец. 141 / Є. П. Штепа, К. А. Шейда Голбад ; Каф. електромеханіки та мехатроніки. — Одеса : ОНТУ, 2023. — 43 с.

2. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спец.141 П. І. Осадчук, В. Ф. Бабіч, А. А. Галіулін, Є. П. Штепа._ Одеса: ОНТУ, 2021. — 47 с.

3. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П.,Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовий О.В.– Кременчук, 2001.–410 с.

4. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник /О. І. Толочко. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.

5. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 905 від 16.11.2012

Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#n20>

6. Суберляк О.В., Баштанник П.І. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів. – Київ.: 2006. – 270с.

7. Допустимі довготривалі струми для проводів, шнурів, кабелів з гумовою або пластмасовою ізоляцією. Витяг з нормативних актів України

Режим доступу: http://norma.org.ua/document/legislation/PUE7/1_3_2.php#google_vignette

8. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 905 від 16.11.2012

Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#n20>

9. Попович М. Г. Теорія електропривода: Підручник / За ред. Поповича М. Г. –К.:Вища школа, 1993. – 494с.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Тяговий асинхронний двигун СТА-1200 // [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://em.fea.kpi.ua/index.php/nauka/rozrobky-kafedry/338-tyagovij-asinkhronnij-dvigun-sta-1200>

11. Пушков П.М., Андрейченко В.П., Кульбашный А.В. «Методичні вказівки до практичних і самостійних занять з тягових розрахунків з дисципліни “Основи електричної тяги”», Харьков, ХНАГХ, 2008. 86с.

12. Михальський В.М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході і виході перетворювачів частоти та напруги з широтно-імпульсною модуляцією. – Київ, Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 340 с.

13. Комп’ютерні пристрої в системах автоматизації. Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи для студентів напрямку підготовки 6.050702 / Уклад: С. М. Ковбаса, С. С. Димко –К.: НТУУ “КПІ”, 2015 р. 25 с.

14. Пересада С.М, Ковбаса С.М. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни ТМС-1. К.: «НТУУ» «КПІ», 2011 40 с.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.2.1	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		